



UNIVERSIDADE DO VALE DO TAQUARI
CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA

**AVALIAÇÃO DO DESGASTE DE MODELO OBTIDO ATRAVÉS DE
MANUFATURA ADITIVA NO PROCESSO DE FUNDIÇÃO EM AREIA
VERDE**

Leandro de Bittencourt

Lajeado, junho de 2020

Leandro de Bittencourt

AVALIAÇÃO DO DESGASTE DE MODELO OBTIDO ATRAVÉS DE MANUFATURA ADITIVA NO PROCESSO DE FUNDIÇÃO EM AREIA VERDE

Monografia apresentada na disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso – Etapa II, na linha de formação específica em Engenharia Mecânica, da Universidade do Vale do Taquari - Univates, como parte da exigência para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. Dr. Guilherme Cortelini da Rosa

Lajeado, junho de 2020

Leandro de Bittencourt

**AVALIAÇÃO DO DESGASTE DE MODELO OBTIDO ATRAVÉS DE
MANUFATURA ADITIVA NO PROCESSO DE FUNDIÇÃO EM AREIA
VERDE**

A Banca examinadora abaixo aprova a Monografia apresentada na disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso – Etapa II, na linha de formação específica em Engenharia Mecânica, da Universidade do Vale do Taquari - Univates, como parte da exigência para a obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Mecânica:

Prof. Dr. Guilherme Cortelini da Rosa – orientador
Universidade do Vale do Taquari - Univates

Lajeado, junho de 2020

RESUMO

A competitividade do mercado atual requer que as empresas inovem e se reinventem continuamente, tanto no que concerne aos seus produtos quanto aos seus processos. Neste sentido, o presente trabalho visa explorar os atos inerentes à fundição e àqueles pertinentes à manufatura aditiva, buscando propor a utilização de modelos não convencionais, como a Manufatura Aditiva por Fabricação com Filamento Fundido, processo de concepção de modelos fundidos para moldagem em areia verde a partir da análise e avaliação do desgaste do material, e estimativa da quantidade de peças produzidas através da moldagem mecanizada. Para isso, foram submetidas amostras de modelos impressos em ABS juntamente com modelos de materiais convencionais, os quais foram testados em condições reais de moldagem mecanizada, produzindo mais de 1200 moldes com medições realizadas em intervalos de aproximadamente 200 peças. Com isso, tornou-se possível verificar se um molde impresso possui a mesma resistência ao desgaste que a madeira ou alumínio.

Palavras-chave: Fundição. Manufatura Aditiva. Prototipagem.

ABSTRACT

The competitiveness of the current market requires companies to continually innovate and reinvent themselves, both with regard to their products and their processes. In this sense, the present work aims to explore the acts inherent to the foundry and those pertinent to additive manufacturing, seeking to propose the use of unconventional models, such as Additive Manufacturing by Manufacturing with Cast Filament, a process for designing cast models for molding in green sand. from the analysis and evaluation of the wear of the material, and estimation of the quantity of parts produced through mechanized molding. For this, samples of models printed in ABS were submitted together with models of conventional materials, which were tested in real mechanized molding conditions, producing more than 1200 molds with measurements carried out at intervals of approximately 200 pieces. With that, it became possible to check if a printed mold has the same wear resistance as wood or aluminum.

Keywords: Casting. Additive Manufacturing. Prototyping.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Processo de moldagem: Areia verde	19
Figura 2 - Processo: Cera perdida	20
Figura 3 - Molde permanente	20
Figura 4 - Fluxograma básico de uma fundição	21
Figura 5 - Conjunto molde e macho	23
Figura 6 - Modelo, caixa de macho, macho e molde	24
Figura 7 - Parâmetros de ângulo de saída e cantos arredondados.....	25
Figura 8 - Moldadora VICK.....	27
Figura 9 - Modeladora VICK em utilização	28
Figura 10 - Etapas de processamento AM	29
Figura 11 - Impressora 3D Ender 3	32
Figura 12 - Formação das camadas de impressão	33
Figura 13 - Caixa de machos com modelos impressos em ABS e PLA	34
Figura 14 – Amostras em PU vermelho, alumínio, PU amarelo e NYLON 66.....	35
Figura 15 - Fluxograma das etapas de submissão de amostras	37
Figura 16 - Dimensões do projeto dos modelos	38
Figura 17 - Ajuste dos parâmetros de impressão.....	40
Figura 18 - Fabricação das amostras através do processo de AM	40
Figura 19 – Amostras finalizadas	41
Figura 20 - Modelos de testes	41

Figura 21 - Pontos de medição das amostras	43
Figura 22 - Medições de temperatura da areia.....	44
Figura 23 - Danos identificados na moldagem 850	48
Figura 24 - Danos identificados no ABS na moldagem 1297	48
Figura 25 - Danos identificados na madeira na moldagem 1297	48
Figura 26 - Danos identificados no alumínio na moldagem 1297.....	49
Figura 27 - Alteração solicitada	50
Figura 28 - Planejamento	50
Figura 29 - Inserto impresso em ABS	50
Figura 30 - Modelo original.....	51
Figura 31 - Modelo alterado	51
Figura 32 - Peças com acréscimo de material	51
Figura 33 – Planejamento de impressão	52
Figura 34 - Construção dos modelos	53
Figura 35 - Placa de moldagem	53
Figura 36 - Peça fundida para análise.....	53

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 - Vida útil para modelos de transição.....	26
Gráfico 2 - Alumínio.....	45
Gráfico 3 - Madeira.....	46
Gráfico 4 - ABS	46
Gráfico 5 – Variação dimensional ao longo dos testes (número de moldes x mm)...	47

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Intervalo de coletas de dados	43
--	----

LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E SÍMBOLOS

Ø	Diâmetro
°C	Graus Celsius
3D	Três Dimensões
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
AM	<i>Additive Manufacturing</i> - Manufatura Aditiva
AMF	<i>Additive Manufacturing Format</i> – Formato de Manufatura Aditiva
BAR	Unidade de pressão
CAD	<i>Computer Aided Design</i> - Desenho Assistido por Computador
CAE	<i>Computer Aided Engineering</i> - Engenharia Assistida por Computador
CAM	<i>Computer Aided Manufacturing</i> - Manufatura Assistida por Computador
CNC	<i>Computer Numeric Control</i> - Controle Numérico Computadorizado
FDM	<i>Fused Deposition Modeling</i> – Fabricação com Filamento Fundido
g	Gramas
h	Hora
kN	Quilo Newton
KWh	Quilowatt-hora
min	Minuto

mm	Milímetros
NBR	Norma Técnica
NYLON 6	Poliamida 6G
NYLON 66	Poliamida 6,6
PDP	Processo de Desenvolvimento de Produto
PLA	Poliácido Láctico
POM	Poliacetel
PU	Poliuretano
SAE	<i>Society of Automotive Engineers</i> – Sociedade de Engenheiros Automotivos.
STL	<i>Stereolithography</i> – Estereolitografia
TCC	Trabalho de Conclusão de Curso

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	12
1.1 Tema	13
1.2 Problema	13
1.3 Objetivos	14
1.3.1 Objetivo geral	14
1.3.2 Objetivos específicos	14
1.4 Justificativa.....	15
1.5 Delimitações do trabalho.....	16
1.6 Estrutura do trabalho.....	16
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	18
2.1 Fundição	18
2.2 Componentes de moldagem	21
2.2.1 Moldes de areia	21
2.2.2 Machos de fundição	22
2.3 Ferramental.....	23
2.3.1 Caixa de Machos	23
2.3.2 Modelos de Fundição.....	24
2.4 Moldagem mecanizada	27
2.4.1 Moldagem mecanizada da areia verde	27
2.5 Manufatura Aditiva	28
2.5.1 Nomenclatura	30
2.5.2 Tipos de AM.....	30
2.5.3 Impressão 3D.....	31

2.5.4 Aplicação da AM.....	33
2.6 Estudo da arte	34
3 METODOLOGIA	37
3.1 Determinação das amostras.....	38
3.2 Determinação do material.....	39
3.3 Confeção das amostras	39
3.4 Determinação dos testes	41
3.5 Moldadora para os testes	42
3.6 Coleta de dados.....	42
4 RESULTADOS OBTIDOS	45
4.1 Outros trabalhos realizados	49
5 CONCLUSÃO	54
REFERÊNCIAS.....	55
APÊNDICE.....	57

1 INTRODUÇÃO

A subsistência da indústria atual está relacionada com a capacidade das empresas em contornar situações mercadológicas adversas, adaptando-se e buscando novas formas de se reinventarem. Neste sentido, desenvolver novos itens, diversificar os produtos existentes e melhorar o processo produtivo são as principais estratégias à manutenção da competitividade. Contudo, essas ações devem ser rápidas, de forma a atender às necessidades dos clientes no exato momento em que surgem as demandas. Para isso, aliam-se, às novas tecnologias, o conhecimento técnico e os recursos, os quais devem estar alinhados com a realidade de cada empreendimento.

Para acompanhar as atualizações de novos produtos, se faz necessário reduzir o tempo de desenvolvimento e o processo de produção, usando-se ferramentas e tecnologias conhecidas que auxiliam nessas etapas, como por exemplo, *softwares* computacionais e de simulação, equipamentos de usinagem CNC e prototipagem.

A partir disso, verifica-se a importância da tecnologia computacional, comumente utilizada na indústria, além dos softwares CAD, CAM e CAE, que também fazem parte do processo produtivo e do desenvolvimento do produto. Todavia, há outras tecnologias aplicáveis como, por exemplo, a manufatura aditiva, que está sob aperfeiçoamento, entrando e se popularizando no mercado.

Devido à facilidade e à quantidade de informações disponíveis na globalização atual, as tecnologias possuem um crescimento muito acelerado, além de contar com *upgrades* constantes. Um exemplo, segundo Volpato et. al. (2018), é a tecnologia de

Manufatura Aditiva que, em meio a sua evolução, passou da simples construção de um objeto para testes visuais de aparência (maquetes), à materialização de peças com excelentes propriedades mecânicas e ao uso funcional, como no caso de engrenagens.

Bem como a rápida evolução das tecnologias, as empresas têm o desafio de se aprimorar e implementar novas técnicas para facilitar e acelerar o processo de desenvolvimento de produtos. Diversos autores como LINO et. al. (2000), OLIVEIRA et. al. (2004) e VOLPATO (2007) sugerem que o tempo de desenvolvimento de um produto é o fator crítico que impulsiona a competitividade comercial. Ainda, segundo eles, as crescentes e constantes alterações produtivas têm ocorrido em prazos mais curtos, o que não só diminui a vida útil do produto como também reduz a quantidade de lotes de produção.

No ramo de desenvolvimento de produtos, a indústria de fundição conta com extremos no que concerne ao uso da tecnologia, visto que algumas empresas contam com aparatos tecnológicos de ponta, enquanto outras ainda dispõem de processos simples e, até mesmo, artesanais.

1.1 Tema

Diante da necessidade emergente da criação de novos produtos que visem a agilidade dos processos de desenvolvimento, o presente trabalho tem como intuito propor a utilização de um protótipo confeccionado em material ABS através do processo de Manufatura Aditiva, validando a sua aplicabilidade e comparando o desgaste sofrido com outros materiais utilizados na indústria de fundição.

1.2 Problema

Na indústria de fundição, o desenvolvimento de produtos demanda bastante tempo, uma vez que a construção e a fabricação de ferramentais em usinadoras para a produção das peças têm alto custo frente à durabilidade dos materiais utilizados, como alumínio, aço, ferro fundido e latão.

Neste sentido, a demanda de tempo e o custo elevado na concepção de modelos para itens de baixa produção tornam-se inviáveis, uma vez que o segundo será determinado pelo número de peças produzidas em um dado prazo estipulado na primeira, o que não só elevará o valor do produto final, em razão da lenta produção, como poderá fazer com que o cliente desista da compra.

Uma alternativa mais econômica ao processo é a utilização de ferramentais de madeira, os quais, todavia, como são feitos artesanalmente, exigem mão de obra especializada para a realização de tal tarefa e se caracterizam enquanto muito mais frágeis em relação a outros materiais.

A utilização de modelos fabricados pelo processo de manufatura aditiva em impressoras 3D nas fundições já é realidade, porém, sua aplicação está direcionada apenas para protótipos de produto e poucas peças produzidas. Sua aplicabilidade, como modelo, para a efetiva produção em série, ainda é questionável, pois parâmetros, como resistência e desgaste dimensional, são desconhecidos.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo geral

Quantificar o desgaste e a vida útil de modelos fabricados por impressão 3D, comparando-os com modelos de materiais usualmente aplicados a um processo de moldagem mecanizada em areia verde.

1.3.2 Objetivos específicos

a) Construir modelos simples de fundição em alumínio e madeira no processo tradicional de usinagem e em plástico ABS no processo de manufatura aditiva de FDM;

b) Submeter as amostras como itens secundários no processo de moldagem mecanizada em areia verde;

- c) Produzir, no mínimo, 1000 moldes para avaliação;
- d) Acompanhar o desgaste dimensional entre os lotes de produção;
- e) Comparar, através de gráficos, o desgaste ocorrido nos modelos.

1.4 Justificativa

A concorrência econômica força as indústrias a buscarem novos métodos de produção e desenvolvimento de produtos que reduzam o tempo de concepção de um novo item (VOLPATO *et. al.*, 2007). A isto, alia-se a curta vida útil dos produtos disponíveis no mercado (OLIVEIRA *et. al.*, 2004), o que requer lotes menores de suas versões.

Segundo essas afirmações, pode-se observar, no segmento de fundição, que há a necessidade de aprimoramento nos processos e diminuição no tempo de desenvolvimento do produto, além da redução dos custos do ferramental para itens de menor produção.

Dessa forma, nos itens com menor demanda, não se justifica a utilização de ferramentais de alta durabilidade e custo elevado, uma vez que o tempo de retorno desse investimento será lento e improvável.

A utilização da madeira como matéria – prima é uma outra alternativa hábil à redução do custo desse ferramental, porém, por ser um processo artesanal, requer-se o auxílio de um modelista, profissional que será responsável pela precisão do modelo e que, dependendo da sua experiência e/ou comprometimento, sujeitará o processo ao erro humano, visto que suas ações podem acarretar em problemas de fundição, como deslocamentos, quebras de bolo, defeitos de montagem de macho, entre outros.

A partir da análise destas duas alternativas, sendo a primeira com processo mais caro e a segunda, mais instável, percebe-se que o uso de novas tecnologias pode oferecer recursos alternativos para amenizar os problemas observados.

1.5 Delimitações do trabalho

Este trabalho está restrito à análise de desgaste das amostras confeccionadas, uma vez que o custo do ferramental de fundição sofre variação pela complexidade da geometria da peça requerida, assim como o material utilizado para o modelo e os processos de fabricação envolvidos, limitando-se a quantificação e a comparação.

A análise dimensional é realizada apenas nas amostras (modelos) e não no produto final (fundido), visto que afetaria, de modo direto, a programação de produção da empresa, como o consumo de matéria prima, impactando também no custo da peça principal.

Os testes ocorreram no processo de moldagem mecanizada em areia verde, sendo que outros processos, como o de moldagem manual ou de moldagem *Cold Box*, não são avaliados neste trabalho.

Os equipamentos e processos utilizados e analisados são destinados à produção de peças em ferro fundido e aço fundido através do vazamento por gravidade, excluindo-se àqueles que visam a obtenção de outras ligas metálicas ou outros processos de fundição, como cera perdida e injeção.

1.6 Estrutura do trabalho

Este trabalho está estruturado em três capítulos, sendo que, no primeiro, apresenta-se o posicionamento do autor e os conceitos que motivam este estudo, o que ocorre ao longo do tema, problema, objetivos, delimitações e da estrutura do trabalho.

O segundo capítulo aborda o referencial teórico referente ao processo de fundição, projetos, moldes, manufatura aditiva com seus tipos e aplicações, abrangendo, também, o estado da arte com dois estudos de trabalhos similares na área da Manufatura Aditiva, Tecnologia dos Materiais e Fundição.

O terceiro capítulo dispõe sobre as determinações dos parâmetros do estudo, a forma de construção das amostras e a coleta de dados.

No capítulo posterior são identificados os resultados obtidos e o relato de outros trabalhos relacionados a este estudo, enquanto que o último versa acerca das conclusões obtidas.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo serão abordados os conceitos e as terminologias utilizadas no processo de fundição, além de analisados os parâmetros de projetos de ferramentais e de moldagem, a estimativa de vida útil, conforme a NBR 12789, e os conceitos de da manufatura aditiva, os tipos e as aplicações.

2.1 Fundição

Para Siengel (1985), a fundição é o derramamento de uma determinada liga metálica, em seu estado líquido, sobre uma cavidade denominada de molde, que representa a peça desejada em sua forma negativa. Ao solidificar o material, obtém-se o produto com a geometria requerida. Este processo de fabricação é milenar e evoluiu ao passar do tempo, tornando-se o método de produção mais versátil e que, além disso, permite a produção econômica de itens em série e a contemplação peças com geometrias complexas e difíceis de obter com outros métodos (BALDAM; 2014).

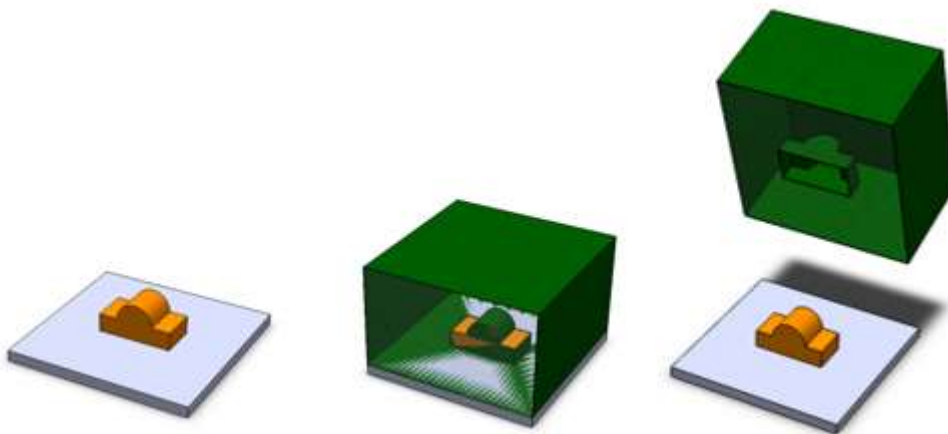
A partir deste conceito, o processo de fundição é dividido em oito principais métodos de obtenção de peças fundidas, quais sejam: moldagem em areia verde, moldagem em casca, *Shell Molding*, *Cold Box*, fundição sob pressão, fundição centrífuga, fundição de precisão e alta precisão. Todas estas técnicas são utilizadas na fundição de metais e podem ser combinadas, como por exemplo, na utilização de machos fabricados pelo processo de *Shell Molding* em moldes *Cold Box*.

A moldagem em areia verde é o método mais tradicional e consiste em acomodar a matéria (areia) no molde, para que se obtenha o formato da peça nele retida após a moldagem.

Outra variação deste processo é o *Shell Molding*, que consiste em uma areia especial coberta com resina que, ao ser acomodada em um modelo quente, tem seus grãos de areia unidos sob a forma de um molde.

Também há moldes *Cold Box*, que são compostos de uma areia especial acomodada no modelo e sobre a qual é aplicado um catalisador em forma de gás, ou dependendo da resina, ao ar livre, com vistas de garantir a completa aglomeração dos grãos.

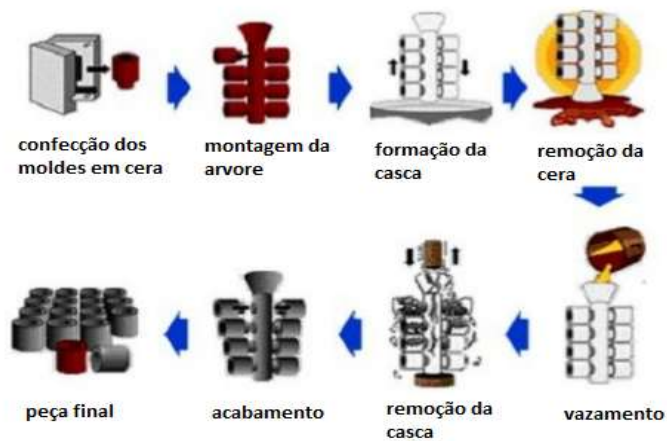
Figura 1 - Processo de moldagem: Areia verde



Fonte: Leandro de Bittencourt.

Existem outros tipos de processos como, por exemplo, modelos de cera perdida, mais complexos e demorados, mas com peças mais precisas e acabamentos superficiais. Para a obtenção de peças fundidas neste processo, primeiramente, são construídos os modelos em cera, mergulhando-os em uma espécie de tinta refratária, repetindo-se o processo várias vezes, após a secagem, até que a camada tenha uma espessura relativamente resistente. Posteriormente, em um forno, extrai-se a cera do interior da árvore, deixando apenas a casca refratária para que seja preenchida com o metal líquido. Por fim, a casca é quebrada, retirando-se dela, as peças fundidas.

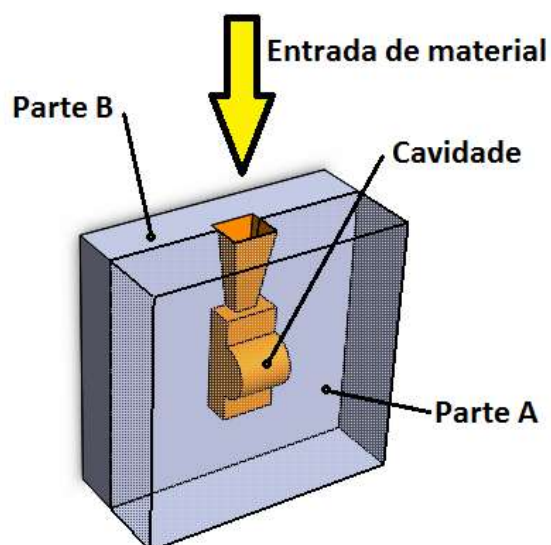
Figura 2 - Processo: Cera perdida



Fonte: MORO, 2007, p. 14

Ainda, há processos que utilizam moldes permanentes para a fabricação, isto é, um mesmo molde para produzir diversas peças fundidas. Normalmente, ele é utilizado na fabricação de peças em alumínio ou antimônio, onde o ponto de fusão dos materiais é menor e, geralmente, o depósito dos materiais ocorre por gravidade ou injeção para dentro do molde.

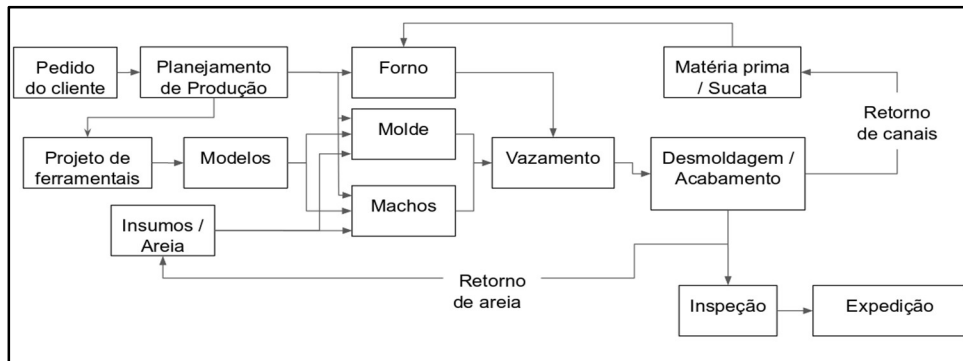
Figura 3 - Molde permanente



Fonte: Leandro de Bittencourt.

Basicamente todo processo se divide em etapas de projeto, fabricação do ferramental, confecção dos machos, produção dos moldes, fusão do material, vazamento, desmoldagem e acabamento.

Figura 4 - Fluxograma básico de uma fundição



Fonte: Adaptado pelo autor com base em Baldam (2014, p. 24).

A determinação da escolha de cada processo de fabricação deve ser feita levando-se em consideração a geometria da peça, o tipo de material fundido, as quantidades de peças necessárias, o nível de acabamento desejado e os custos advindos (BALDAM, 2014).

2.2 Componentes de moldagem

2.2.1 Moldes de areia

O molde ou bolo, como também é conhecido, consiste em um aglomerado de areia e argila, sendo um material com propriedades refratárias capaz de suportar altas temperaturas do metal líquido e de formar uma massa porosa que permite a liberação dos gases oriundos do processo de fusão. Além disso, tem uma propriedade que garante a formação de uma massa plástica bastante resistente, que acomoda a entrada de ferro líquido em qualquer superfície do molde, impedindo o seu desmoronamento.

As areias de moldagem são compostas por sílica, argila, água e uma série de impurezas (óxido de ferro, cal, magnésio, etc.) que variam de acordo com a jazida em que foi extraída. Também são adicionados outros elementos desejáveis, descritos

como aditivos (MARIOTTO, 1986), que promovem uma maior resistência e qualidade do molde, influenciando na qualidade da peça final.

O molde terá o formato negativo das faces externas da peça, ou seja, ele aparentará ser um cubo de areia com uma cavidade ou rebaixo na forma da peça requerida.

2.2.2 Machos de fundição

Machos ou núcleos são componentes da moldagem confeccionados como um aglomerado de areia que tem por finalidade construir as cavidades internas da peça fundida. Os processos mais comuns para a sua confecção são *Cold Box*, *Pep Set* ou *Shell Molding*.

Cada processo possui sua característica própria, como custo do material, tempo de confecção do macho e a resistência térmica e mecânica. Diferente da moldagem da areia verde, os machos não tem a sua resistência obtida através da compactação, e sim de uma reação química que ocorre sobre uma fina camada de resina que envolve o grão da areia, que tem por finalidade unir os grãos. A sua ativação ou endurecimento se dá por calor, no processo *Shell Molding*, por gás catalizador, no *Cold Box*, ou por endurecimento ao ar natural, no caso de *Pep Set*.

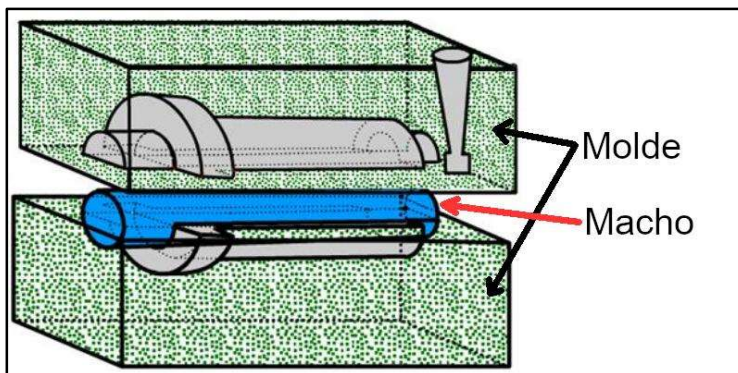
No processo *Shell Molding*, a areia é comprada pronta para o uso (o revestimento do grão é feito pelo fornecedor da areia *Shell*). Para a reação de união dos grãos, ela é submetida a altas temperaturas através de aquecimento com queimadores de gás GLP. Após a deposição da areia na cavidade, a resina reage com o calor, formando o macho utilizado na moldagem, com mais resistência mecânica e à temperatura do material fundido, o que faz com que a sua deterioração ocorra muito tempo após a solidificação do material.

No processo *Cold Box*, a areia é misturada com a resina em equipamentos especiais, denominados de misturadores. Após, a areia coberta com a fina camada de resina é posta na cavidade da caixa de machos. Neste processo, o endurecimento da resina ocorrerá mediante a passagem de um gás catalizador entre os grãos

(geralmente, a cura do macho ocorre em poucos segundos, dependendo da quantidade de areia utilizada).

No processo de *Pep Set*, a areia é coberta por uma fina camada de resina, assim como no *Cold Box*, porém, neste, especificamente, ela é composta por duas partes e por um catalizador líquido, o que permite que a reação demore até duas horas para começar a ocorrer, dando tempo ao moldador para preencher a cavidade da caixa de macho antes que a mistura inicie a cura.

Figura 5 - Conjunto molde e macho



Fonte: FERRAZ, 2011, p. 14.

2.3 Ferramental

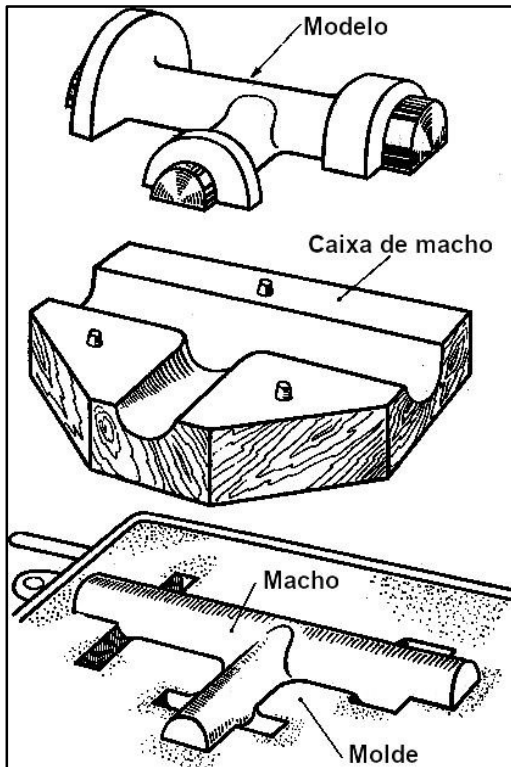
2.3.1 Caixa de Machos

Para a confecção dos machos, utiliza-se uma ferramenta denominada de caixa de machos. Este tipo de ferramental costuma ter a aparência de uma caixa retangular, sendo que uma das faces contém a cavidade que dará o formato ao macho. No caso de uma peça fundida apresentar um furo com determinado diâmetro, o macho terá uma forma cilíndrica e a caixa de machos será o negativo deste cilindro, em forma de cavidade ou rebaixo na caixa.

Nas caixas de machos do processo de Shell Molding são utilizados materiais resistentes à temperatura, com baixa dilatação térmica como, por exemplo, o ferro

fundido cinzento. Já nos processos de Cold Box e de Pep Set são usados uma grande variedade de materiais, como alumínio, ferro fundido, madeira, etc.

Figura 6 - Modelo, caixa de macho, macho e molde



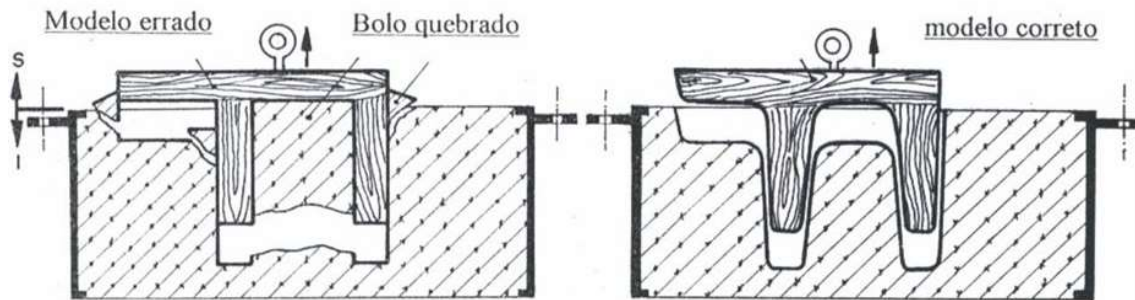
Fonte: TORRE, 2004, p. 24

2.3.2 Modelos de Fundição

Para que os moldes possam ser produzidos repetidamente é necessária a utilização de um modelo de fundição que tem por finalidade dar-lhes formas negativas através da aparência da peça requerida de forma positiva.

Um modelo de fundição, para ser considerado adequado e funcional à utilização na moldagem dos moldes, deve ser bem projetado. Alguns aspectos do projeto são essenciais para um bom desempenho no processo como um todo, que deve pautar-se em parâmetros de contração da solidificação do material fundido, nos ângulos de saída (FIGURA) e nos cantos arredondados, além dos posicionadores e apoios de machos.

Figura 7 - Parâmetros de ângulo de saída e cantos arredondados



Fonte: ESTRELA, 2016, p. 14.

Normalmente, os ferramentais de fundição são construídos em diversos materiais, mas, geralmente, utiliza-se o alumínio, a madeira, o ferro fundido, o aço ou a resina *Epoxy*. A determinação do material se dá pela precisão dimensional da peça requerida, da durabilidade do modelo e da estimativa de peças a serem produzidas.

O desgaste é o principal fator que determina a vida útil de um modelo, visto que resulta na perda dimensional dele, impactando de forma direta na dimensão do produto final. A norma técnica NBR 12798 (ABNT, 1993) classifica os ferramentais de acordo com a precisão dimensional da peça final e a precisão do modelo, relacionando-os com o material utilizado e determinando a estimativa por perda dimensional sofrida pelo molde e a classe de tolerância dos modelos e caixas de machos com o material utilizado para fabricá-las.

Figura 8 - Classificação de ferramental quanto à tolerância dimensional

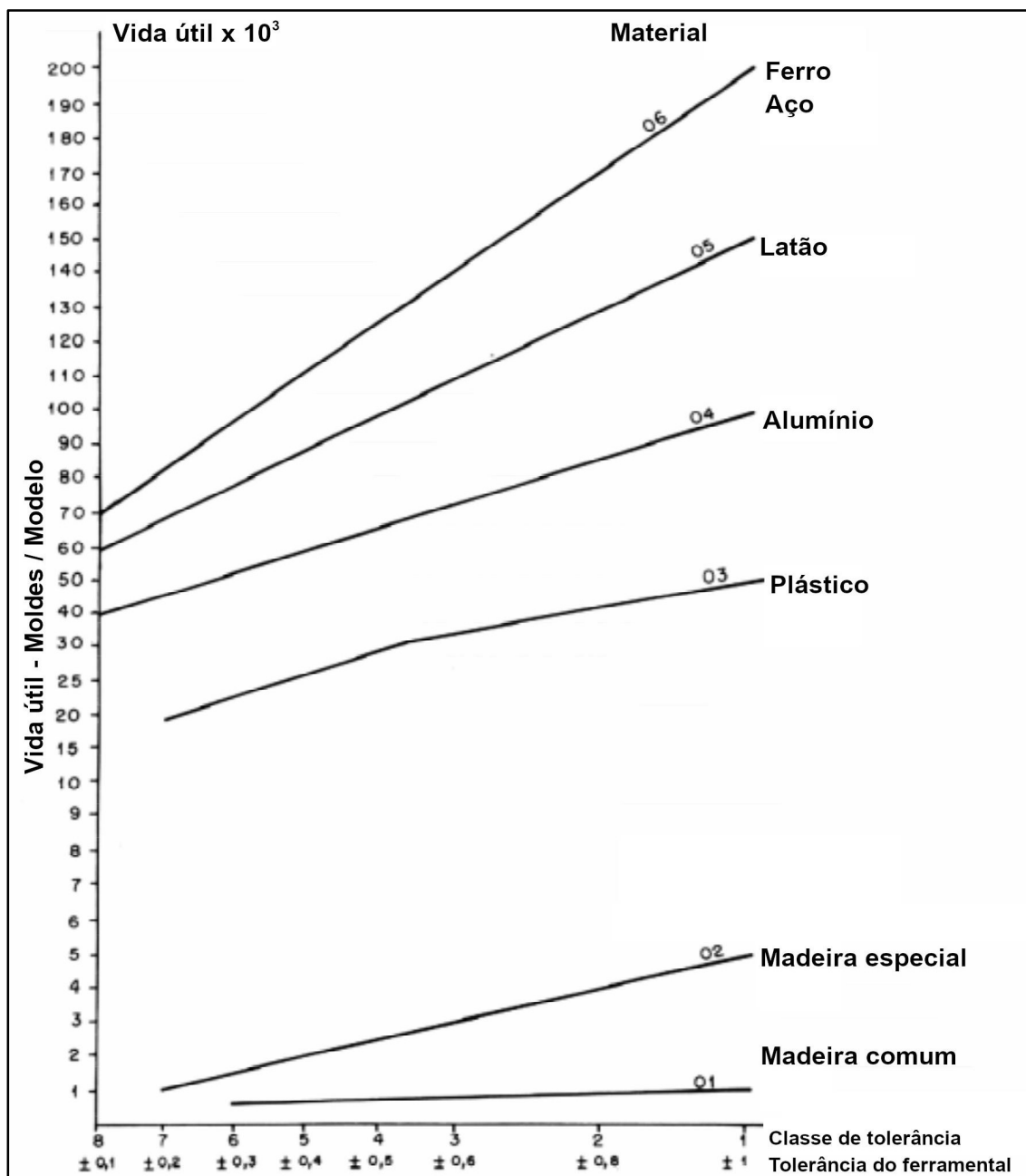
Classe de tolerância (Y)	Ferramental de moldagem								Menor tolerância do ferramental (mm)	Menor tolerância da peça fundida (mm)
	Madeira comum	Madeira especial	Poliestireno	Plástico	Alumínio	Latão	Ferro	Aço		
1	MC	ME	-	PL	AL	LA	FE	AC	$\pm 1,0$	Acima de $\pm 2,50$
2	MC	ME	-	PL	AL	LA	FE	AC	$\pm 0,8$	$\pm 1,81$ a $\pm 2,50$
3	MC	ME	-	PL	AL	LA	FE	AC	$\pm 0,6$	$\pm 1,51$ a $\pm 1,80$
4	MC	ME	-	PL	AL	LA	FE	AC	$\pm 0,5$	$\pm 1,01$ a $\pm 1,50$
5	MC	ME	-	PL	AL	LA	FE	AC	$\pm 0,4$	$\pm 0,81$ a $\pm 1,00$
6	-	ME	-	PL	AL	LA	FE	AC	$\pm 0,3$	$\pm 0,61$ a $\pm 0,80$
7	-	-	-	PL	AL	LA	FE	AC	$\pm 0,2$	$\pm 0,41$ a $\pm 0,60$
8	-	-	-	-	AL	LA	FE	AC	$\pm 0,1$	$\pm 0,4$

Fonte: ABNT NBR 12798, 1993, p. 3.

Sendo, MC a sigla para Madeira Comum; ME, Madeira especial; PL, Plástico; AL, Alumínio; FE, Ferro e AC, Aço.

Outra informação importante extraída da norma é o gráfico de estimativa de vida útil, em que o eixo vertical é informa a quantidade de moldes produzidos, e o horizontal representa a redução de dimensão, em milímetros, verificada após as moldagens. Para cada material é gerada uma curva característica que mostra o desgaste ao longo da produção.

Gráfico 1 - Vida útil para modelos de transição



2.4 Moldagem mecanizada

2.4.1 Moldagem mecanizada da areia verde

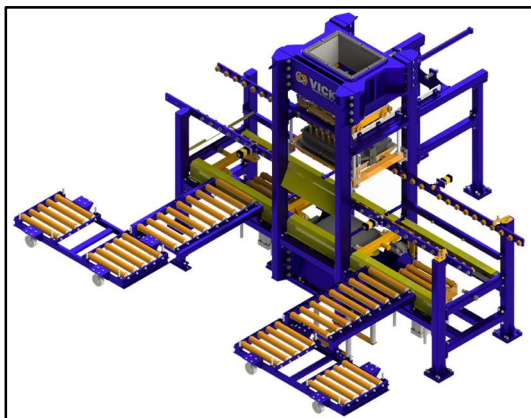
As indústrias de fundição, que atuam com o processo de moldagem em areia verde, já contam com diversos fabricantes de máquinas e equipamentos que automatizam o processo de moldagem.

Estas máquinas desempenham o papel de enchimento do molde com areia e realizam a compactação através de cilindros hidráulicos. Algumas delas atuam no fechamento do molde e, posteriormente, no desmolde (retirada da peça fundida do molde).

As máquinas de moldar visam o enchimento, a prensagem e a retirada do molde, customizando os projetos de acordo com a realidade de cada empresa. Neste sentido, um desses parâmetros de customização refere-se à capacidade dimensional máxima das peças a serem produzidas. Contudo, a automatização desse processo tem, enquanto desafio, aliar a busca pela alta velocidade de produção e a manutenção da qualidade.

As moldadoras influenciam muito na qualidade dos moldes produzidos. Uma máquina bem ajustada, por exemplo, pode diminuir deslocamentos de modelos ou quebra de bolo, entre outros defeitos de processo.

Figura 9 - Moldadora VICK



Fonte: Site da empresa VICK MÁQUINAS. ¹

¹ Disponível em www.vickmaquinas.com.br

Figura 10 - Modeladora VICK em utilização



Fonte: Site da empresa VICK MÁQUINAS.²

2.5 Manufatura Aditiva

Os processos fundamentais de fabricação normalmente são baseados nos princípios da moldagem, usinagem, conformação, união, divisão e adição de material.

A moldagem engloba processos, como fundição, injeção de plástico, metalurgia do pó, moldagem em fibra de vidro ou fibra de carbono, entre outros, que utilizam moldes para reproduzir as peças.

Por outro lado, a remoção consiste na retirada de materiais de um determinado bloco e trata de qualquer tipo de usinagem, seja torneamento, fresamento, furação, retificação ou usinagem eletroquímica.

A conformação utiliza a deformação plástica de um determinado material como, por exemplo, o forjamento, a laminação, a extrusão, entre outros. Já o processo de união consiste na colagem e soldagem de fragmentos para a construção da geometria requerida, enquanto que a divisão compreende atividades de corte.

No processo de adição de material ocorre a criação de determinada geometria através da deposição daquele em forma de camadas.

² Disponível em www.vickmaquinas.com.br

Apresentado em meados dos anos 80 e atualmente denominado de *Additive Manufacturing*, a Manufatura Aditiva é conhecida, popularmente, como Impressão 3D (VOLPATO *et. al.*, 2018).

Com o auxílio de sistemas CAD, a geometria da peça é previamente determinada virtualmente para, posteriormente, o arquivo de desenho ser importado para o equipamento de AM.

As etapas para a materialização de peças pelo processo de AM são:

- 1) Modelagem tridimensional, em que se utilizam *softwares* CAD para modelar virtualmente a geometria da peça idealizada;
- 2) Conversão do arquivo CAD para um arquivo compatível com o equipamento AM, o que se dá, normalmente, através de uma extensão STL ou AMF;
- 3) Planejamento de construção pelo equipamento AM, que ocorre pelo fatiamento da geometria 3D em planos de duas dimensões (2D), definindo, também, o plano de construção e o material de apoio.
- 4) Construção da peça a partir da preparação e alimentação da máquina, a qual estará apta para efetivar o plano de construção;
- 5) Pós-processamento, em que ocorre a limpeza e o acabamento do produto impresso, podendo variar de acordo com cada equipamento e envolver outros processos, como usinagem e tratamento superficiais.

Figura 11 - Etapas de processamento AM

			
Modelo geométrico 3D (por exemplo, CAD)	Planejamento de processo (fatiamento)	Processamento por adição das camadas	Peça fabricada
Modelo eletrônico 3D		Modelo físico	

Fonte: Volpato *et. al.*, 2018, p. 17.

2.5.1 Nomenclatura

Ao longo do tempo, diversos autores vêm se referindo a tecnologia de Manufatura Aditiva utilizando outros termos, como Prototipagem Rápida, Manufatura de Bancada, Manufatura de Camada, embora esta seja, atualmente, a nomenclatura mais aceita pela comunidade científica. Tal diversificação acontece porque cada autor expressava da sua maneira as diversas formas de obtenção de peças, mas, devido ao grande número de formas deste processo, a denominação que melhor representa o processo é a *Additive Manufacturing*.

Ainda que a tecnologia de AM seja conhecida como Impressão 3D, a norma ISO ABNT 52900 (2015) diz que o termo que melhor representa o processo é Manufatura Aditiva, utilizando a sua nomenclatura popular somente para se referir aos equipamentos de menor custo disponíveis no mercado.

2.5.2 Tipos de AM

O processo de AM pode ser inicialmente classificado pelo estado da matéria prima utilizada na fabricação da geometria, que pode ser material líquido, sólido ou em pó.

Dentro dessas classificações, encontramos, no processo líquido, os equipamentos de estereolitografia que, basicamente, utilizam um sistema de varredura para direcionar um feixe de laser sob um depósito de resina fotocurável que, ao ser atingida, forma uma camada consistente que, posteriormente, direcionará o laser à formação das camadas superiores e abrangerá todas as peças, submetendo-as a um forno que finalizará o processo de cura e o acabamento, removendo o material de apoio quando necessário.

A impressão por jato de tinta ou *PolyJet* também utiliza os meios líquidos para a formação da geometria. Desenvolvida em meados de 1998, ela é similar à tecnologia anterior, visto que utiliza, igualmente, as resinas fotocuráveis. Todavia, esta é depositada em forma de jato sobre uma bandeja sendo, posteriormente, atingida por um cabeçote que lança uma luz ultravioleta para curá-la.

No grupo de processos baseados em pó, o material é depositado em camadas, sobre as quais agirá um sistema de varredura direcionará um feixe de laser responsável pela sintetização da matéria e consequente formação das camadas da geometria.

Ainda que o termo sintetização seja utilizado, alguns processos elevam a temperatura do material ao seu ponto de fusão pela incidência do laser para que as partículas se fundam de acordo com a geometria requerida (VOLPATO *et. al.*, 2007). Além disso, outros processos similares utilizam jato de tinta para o agrupamento do material ao invés do feixe de laser.

Nos processos baseados em sólidos, a matéria prima encontra-se solidificada, em forma de lâmina, filamento ou sob sem forma definida, pois será fundida antes de ser depositada. Este último possui pouca diferença em relação àqueles baseados em líquidos, visto que apenas mudará o estado inicial da matéria (VOLPATO *et. al.*, 2007).

Por outro lado, a tecnologia da deposição em lâminas consiste em um acumulado de papel cortado e sobreposto, camada por camada, que dará forma tridimensional ao objeto.

O processo de deposição por extrusão se trata, basicamente, da construção do objeto através da extrusão no material e vem tendo um crescimento muito expressivo ao longo dos anos. Por utilizar componentes de baixo custo e de fácil manuseio, ele pode ser utilizado em pequenos espaços, como escritórios, não requerendo cuidados especiais com o ambiente de trabalho.

2.5.3 Impressão 3D

Segundo Volpato *et al.* (2018), a impressão 3D é o termo utilizado para a manufatura aditiva obtida através de equipamentos de menor custo, trabalhando com a deposição de material em sua forma fundida e fornecendo-o em forma de filamentos com diâmetros constantes de 1,75 mm a 2,85 mm, que podem ser fabricados a partir de diversos materiais, como ABS, PLA, flexíveis e outros desenvolvidos pelo mercado.

O equipamento é constituído por um cabeçote de extrusão, uma base, barramentos e uma central de comando. O material é forçado para dentro do cabeçote

de extrusão, tem a função de aquecê-lo até seu ponto de fusão, permitindo, assim, a passagem por um bico calibrado e a deposição do mesmo por roldanas que tracionam, controladamente, o filamento.

Dependendo da construção da máquina, a mesa ou o cabeçote se movimentam nas coordenadas x, y ou z, percorrendo, desta forma, o plano de construção pré-definido na etapa de fatiamento do arquivo STL. Ao ser depositado, o material se funde com a camada inferior, que se solidifica, gerando, assim, um novo contorno ou preenchimento.

Figura 12 - Impressora 3D Ender 3



Fonte: Creality³

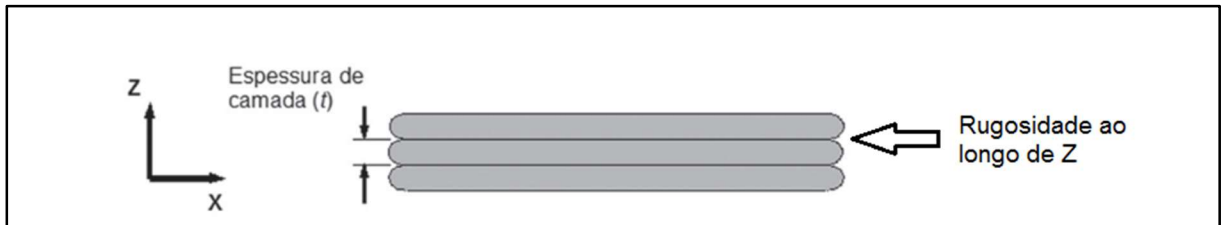
Seu baixo custo e a facilidade de manutenção são algumas das vantagens deste tipo de equipamento, porém, as geometrias que necessitam de material de suporte tendem a ter um acabamento superficial ruim. As paredes das peças impressas também apresentam uma leve rugosidade, pois a deposição das camadas ao longo do eixo Z deixam ranhuras entre elas. Para peças totalmente lisas, se faz necessário um acabamento final de forma manual.

Um equipamento convencional de impressão 3D (FFF) pode ser encontrado no mercado por um valor que varia entre R\$2.000,00 (dois mil reais) a R\$2.800,00 (dois

³ <www.creality.com>

mil e oitocentos reais), podendo ser muito maior quando se trata de outros processos de deposição de material, maiores capacidades de impressão ou melhor qualidade.

Figura 13 - Formação das camadas de impressão



Fonte: Adaptado de Volpato *et. al.*, 2018, p. 158.

2.5.4 Aplicação da AM

A manufatura aditiva vem sendo aplicada em diversos segmentos da indústria, principalmente, no processo de desenvolvimento de produtos, em que atua como um mecanismo de materialização rápida de objetos e maquetes para a validação visual do mesmo. Com avanço desta tecnologia tornou-se possível a construção de ferramentais rápidos e até de produtos finais utilizados nos setores automotivo, industrial, de aviação, de saúde, etc.

A construção de ferramental rápido foi o segmento da AM que permitiu a construção de protótipos funcionais de moldes para diversas finalidades. Indústrias que necessitam de modelos para a produção de lotes de peças podem utilizar alguma forma de construção por manufatura aditiva para obtê-los, dependendo da aplicação e da quantidade de peças desejadas.

Processos de AM que utilizam ligas metálicas, inclusive, já podem competir com outros métodos tradicionais de confecção de modelos definitivos (VOLPATO *et. al.*, 2018).

O setor de fundição tradicional também pode utilizar a tecnologia de AM para a substituição dos modelos protótipos convencionais feitos em madeira, desde que tenham resistência suficiente para suportar o processo de moldagem, e na construção de moldes perdidos, em cera perdida ou no processo de construção direta em areia de fundição.

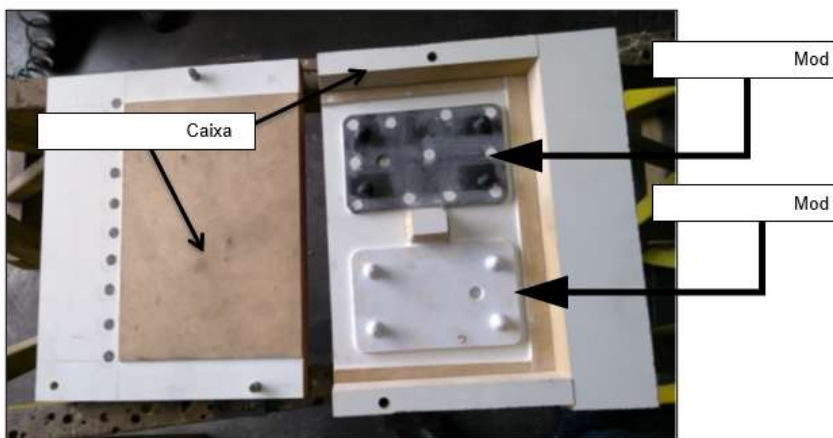
Os processos de confecção de ferramental direto estão sempre em constante aperfeiçoamento, visto serem objeto de estudo por universidades, embora pouco empregados na indústria (VOLPATO *et. al.*, 2007).

2.6 Estudo da arte

Albuquerque (2017), em seu “Estudo da Fabricação de Ferramental de Fundição por Manufatura Aditiva”, realiza testes de moldagem utilizando modelos fabricados pelo método de AM por FDM, em impressora 3D convencional e com uma sopradora de machos *Cold Box*, em que a caixa de machos é preenchida de areia e transportada por um sopro de ar com alta pressão. Segundo o autor, tal equipamento foi escolhido pelo fato de possuir uma maior exigência mecânica do ferramental, sofrendo mais desgaste e possibilitando avaliar a perda dimensional em um menor espaço de tempo.

Na experiência, foram fabricados dois modelos com materiais diferentes, sendo um em PLA e outro em ABS, ambos dispostos lado a lado, conforme a Figura 13. Posteriormente, eles foram submetidos a 200 ciclos de produção com um intervalo de medição de 100 ciclos.

Figura 14 - Caixa de machos com modelos impressos em ABS e PLA



Fonte: Adaptado de Albuquerque, 2017, p. 34.

Após a verificação dimensional, o autor quantificou os custos de fabricação desses modelos, comparando-os com métodos convencionais para determinar a viabilidade econômica do projeto.

Na finalização do trabalho, Albuquerque (2017) conclui que os modelos obtidos por AM atendem os requisitos necessários para o processo de fundição, produzindo peças iguais aos modelos tradicionais. Apesar de serem de fácil construção, o processo de impressão é lento, devido à necessidade de um melhor acabamento superficial. Ainda, segundo ele, o custo depende muito da complexidade do modelo, sendo que, quanto maior o grau de dificuldade, mais vantajosa se torna a AM.

Dos modelos por ele testados, o que apresentou um melhor desempenho contra a abrasão foi o PLA, visto que produziu peças com qualidade superior e com desgaste inferior.

Outro trabalho que avalia as condições de diversos materiais poliméricos em condições de moldagem mecanizada no processo de fundição em areia verde foi publicado por Benedetto (2009). Em seu estágio curricular na Universidade Federal de Santa Catarina, o autor submeteu, a uma moldadora DISA, que compacta a areia verde através da compressão de suas placas, amostras usinadas de blocos maciços em PU, POM, NYLON, NYLON 6,6 e alumínio, sob condições reais de moldagem, de forma a avaliar o desgaste sofrido, dispondo-as com vistas de que não interferissem no processo produtivo.

Figura 15 – Amostras em PU vermelho, alumínio, PU amarelo e NYLON 66



Fonte: BENEDETTO, 2009, p. 9

Com este estudo, o autor qualificou as amostras através de um método de atribuição de notas para cada ponto analisado, quais sejam, a facilidade de usinagem, o desgaste, o acabamento, o custo do material, a resistência à quebra, a forma de fornecimento comercial (blocos, tarugos, chapas) e a vida útil do modelo.

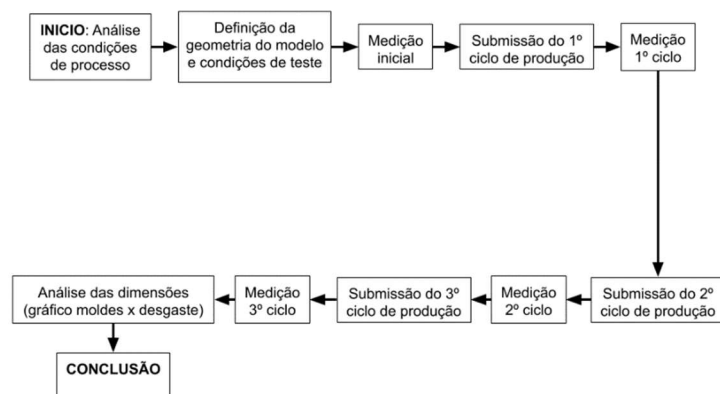
Os estudos apresentados neste subtítulo contribuem para o desenvolvimento do trabalho, pois relacionam processos, métodos e materiais similares aos utilizados, uma vez que o primeiro deles realiza testes avaliando o comportamento dos modelos impressos quanto ao desgaste proveniente do processo de moldagem de forma qualitativa, enquanto que o segundo, apesar das amostras serem confeccionadas em processos diferentes, agrega conhecimento com a metodologia de coleta de dados das amostras.

3 METODOLOGIA

Para o estudo proposto, a metodologia aplicada é a avaliação prática do desgaste sofrido nas amostras, submetidas a condições reais de moldagem mecanizada. Os testes foram realizados em paralelo com o processo de fabricação de peças de linha, o que significa que as condições em que as amostras foram submetidas são exatamente iguais às condições de produção de peças da linha de produção.

Foram confeccionadas amostras de diferentes materiais nos processos convencionais de usinagem. Com o processo de manufatura aditiva, seguindo a produção de aproximadamente 150 a 200 moldes, foi verificado o dimensional dos modelos e transcritos os valores em uma planilha para a melhor visualização dos resultados obtidos.

Figura 16 - Fluxograma das etapas de submissão de amostras



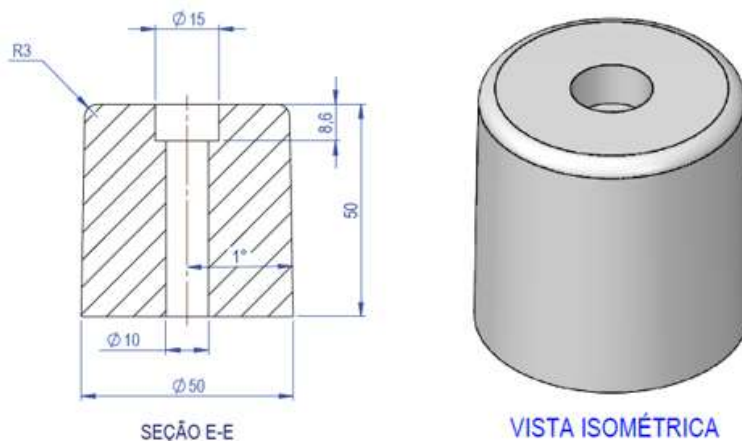
Fonte: Leandro de Bittencourt

3.1 Determinação das amostras

Nos testes, foram utilizadas seis amostras como modelos, sendo duas em alumínio fundido, conforme SAE 306 (mesmo material utilizado para confecção de modelos de fundição), duas em madeira de Cedro e outras duas impressas em ABS. Para comprovação dos resultados obtidos e, por uma questão de segurança quanto à possibilidade de avaria em algum modelo, optou-se por fazer duas peças de cada material.

Para as amostras, determinou-se uma geometria circular simples de 50 mm de diâmetro por 50 mm de altura (FIGURA 16), observando os parâmetros de modelos de fundição, conforme material técnico de Felisbino (2005). Também adicionou-se, aos modelos, uma furação central, para uma rápida fixação da amostra na placa de moldagem, a qual fica por conta de um parafuso Allen M8 por 60 mm. A cada placa escolhida para receber as amostras foi adicionada uma furação com rosca nos locais de fixação.

Figura 17 - Dimensões do projeto dos modelos



Fonte: Leandro de Bittencourt.

3.2 Determinação do material

Através da indicação da literatura (BESKO, 2017), o material utilizado para a confecção do modelo impresso, alvo deste trabalho, foi o ABS, que, além disso, apresenta um ponto de fusão maior em relação à segunda opção, que seria o PLA.

O fator de aquecimento da areia surge devido à utilização de areia reciclada, que ocorre por causa da sua utilização no processo de fundição e posterior retorno ao sistema com a temperatura mais elevada. Como o processo trabalha de forma contínua, quanto maior é a recirculação de areia, maior se eleva a temperatura da mesma.

3.3 Confecção das amostras

Para o desenvolvimento do projeto das amostras, utilizou-se um *software* computacional para o melhor entendimento dos parâmetros adotados e comunicação com o setor de usinagem e modelação, responsáveis pela confecção das amostras em alumínio e madeira.

Na confecção das amostras, não foi requerido uma precisão dimensional entre elas, pois o ponto de interesse é a comparação da dimensão inicial com a final. Para a confecção das impressas em ABS, utilizou-se uma impressora Ender 3 de fabricação chinesa, com capacidade de impressões de 220mm x 220mm x 250mm, e com um bico extrusor de 0,4mm e comporta filamentos de Ø1,75 mm.

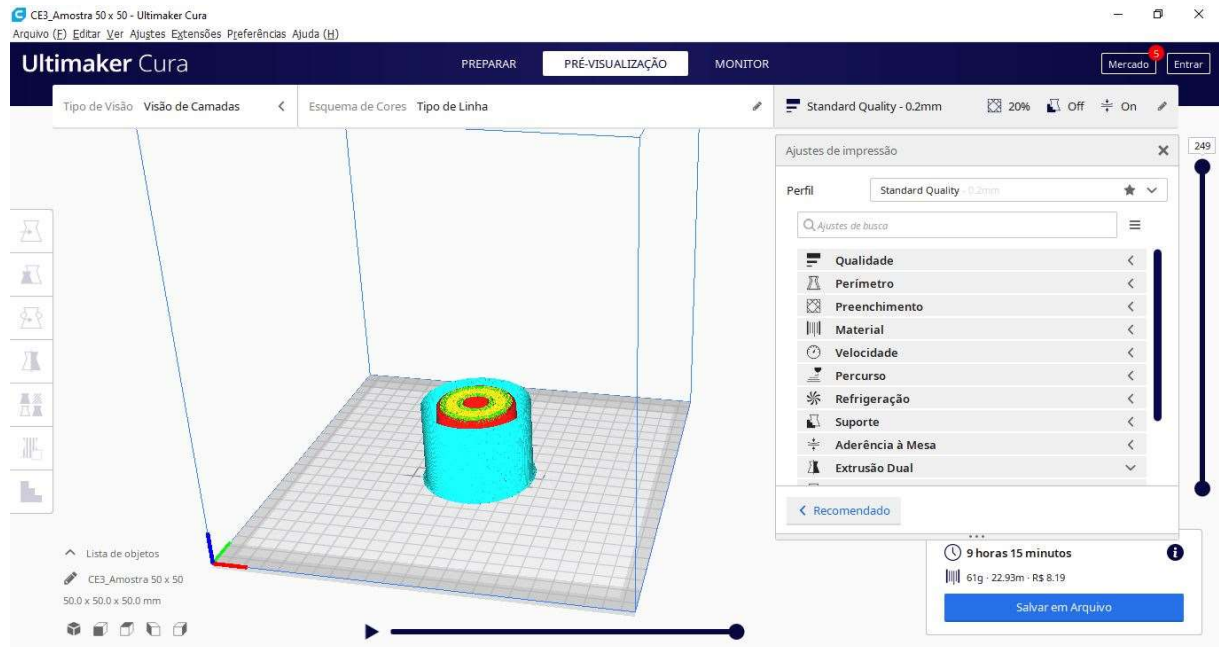
Os parâmetros utilizados no *software Open Source Ultimaker Cura*⁴ foram paredes com 2,5mm de espessura, tanto as laterais quanto a inferior e a superior; preenchimento de 20% estruturado em grade; altura de camada de 0,2mm; barreira para proteção; 110° de temperatura da mesa de impressão e 240° do bico de extrusão.

Conforme simulado, o tempo de fabricação ficou em 9h15min, consumindo 61g de material com um custo aproximado de R\$8,19 (oito reais e dezenove centavos) em filamento. Em média, o custo do filamento é equivalente a R\$100,00 (cem reais) por

⁴ *Software* de código aberto.

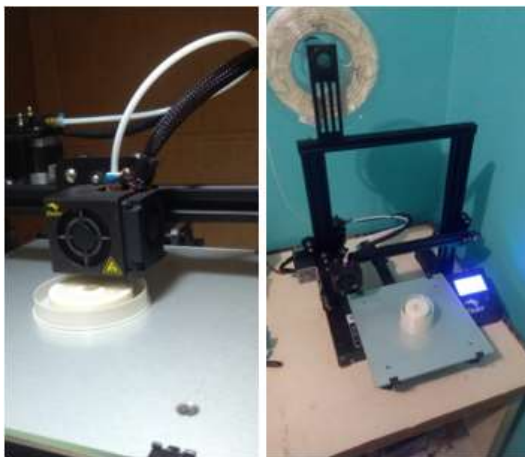
Kg mais R\$35,00 (trinta e cinco reais) de frete, sendo que o consumo de energia do equipamento aproxima-se de 0,695 KWh.

Figura 18 - Ajuste dos parâmetros de impressão



Fonte: Print screen fatiador Ultimaker Cura

Figura 19 - Fabricação das amostras através do processo de AM



Fonte: Leandro de Bittencourt

Figura 20 – Amostras finalizadas



Fonte: Leandro de Bittencourt

3.4 Determinação dos testes

A forma em que os testes foram baseados permite a continuidade do processo produtivo da empresa sem danos na programação, interferência no processo ou custo de produção.

Para que não houvesse custos à empresa, optou-se por não alimentar as cavidades geradas pelos modelos de amostra com ferro líquido, logo, não foram consolidadas como peças fundidas.

As amostras foram dispostas em regiões que não interferissem nas peças existentes, assim como foram escolhidos itens de maior produção, cerca de 150 a 250 moldes por *setup*. A maioria dos itens possui lotes de produção inferior a 80 moldes, o que faria com que a análise se estendesse por um longo período de tempo.

Figura 21 - Modelos de testes



Fonte: Leandro de Bittencourt

A Figura 20 representa os moldes em que foram realizados os testes. Da esquerda à direita, tem-se o modelo de rotor para bomba centrífuga, seguido das argolas para fogão e da tampa para panela.

3.5 Moldadora para os testes

Os testes foram realizados em uma máquina moldadora *Cruvie 2005*, com capacidade de 85 moldes por hora e dimensões dos modelos de 410 mm x 520 mm x 120 mm.

Para a compactação adequada do molde, a moldadora opera com uma pressão de 150 Bar em um cilindro de Ø 100 mm. Pelos cálculos de força para um cilindro hidráulico, a pressão aplicada no modelo é de, aproximadamente, 117,750 kN. Abaixo temos:

$$F = P \times A \quad \text{Equação 1}$$

Onde, P é a pressão de trabalho e A é a área do êmbolo do atuador. Sendo que P equivale a 150 Bar ou 1500 N/cm².

$$A = \pi \times r^2 = 3,1416 \times 5^2 = 78,5 \text{ cm}^2 \quad \text{Equação 2}$$

Logo:

$$F = 1500 \text{ N/cm}^2 \times 78,5 \text{ cm}^2 = 117,750 \text{ kN}$$

3.6 Coleta de dados

Os testes foram realizados em oito coleta de dados, com intervalo médio de 185 moldes. A variação da quantidade de moldes ocorreu devido à programação de produção das peças e as coletas de dados se deram nos seguintes momentos:

Tabela 1 - Intervalo de coletas de dados

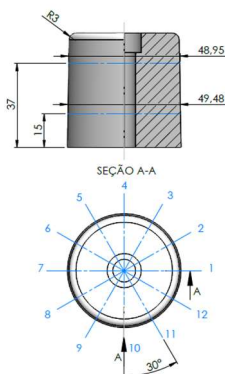
MEDIÇÃO	NÚMERO DE MOLDES PRODUZIDOS	NÚMERO DE MOLDES ACUMULADOS
1ª	0	0
2ª	203	203
3ª	121	324
4ª	152	476
5ª	152	628
6ª	222	850
7ª	222	1072
8	225	1297

Fonte: Leandro de Bittencourt

Para a medição, utilizou-se um paquímetro digital, calibrado, com resolução de 0,01mm, assim como calços de apoio para que a altura fosse igual para todas as coletas de dados.

Com vistas de garantir uma melhor precisão das informações extraídas das amostras, foi determinada a medição em duas alturas, uma a 15 mm da base e outra a 37 mm. As mesmas foram medidas em pontos distanciados por um giro de 30° ao longo de 360°, visto que os pontos 0° e 180°, assim como 30° e 210° e, conseqüentemente, os demais se repetiriam, foram mantidos para que houvesse maior quantidade de pontos de amostragem, refinando o valor médio.

Figura 22 - Pontos de medição das amostras



Fonte: Leandro de Bittencourt

A temperatura da areia foi verificada através de um termômetro por infravermelho, o qual consiste em um equipamento de medição instantâneo e sem contato, através do qual pode-se acompanhar o comportamento da temperatura durante o período de moldagem.

Por padrão determinado pela empresa, a temperatura da areia não pode ultrapassar os 45°C.

Figura 23 - Medições de temperatura da areia



Fonte: Leandro de Bittencourt

4 RESULTADOS OBTIDOS

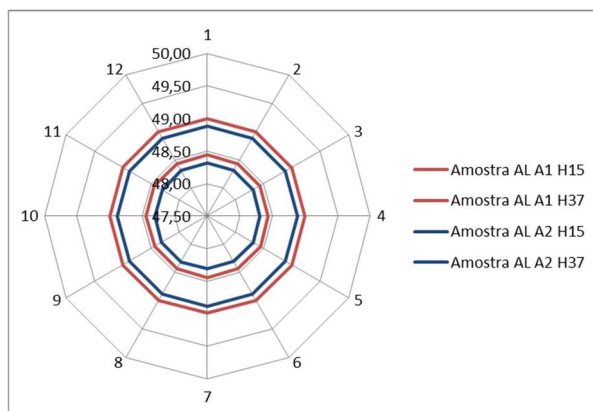
O dimensionamento inicial das peças demonstrou que as amostras em alumínio apresentaram uma circularidade muito mais regular que o modelo impresso. A ovalização evidenciada naquelas impressas indica que o equipamento de impressão apresenta uma desconfiguração no passo dos acionadores dos eixos.

Outro ponto analisado refere-se à amostra de madeira que, devido à fibra do material, apresentou uma pequena variação na dimensão.

Os gráficos abaixo representam, de forma ampliada, a diferença de medida ao longo da circunferência da amostra. Neles, destacam-se, em vermelho, os valores da amostra de número um e, em azul, os referentes a de número dois.

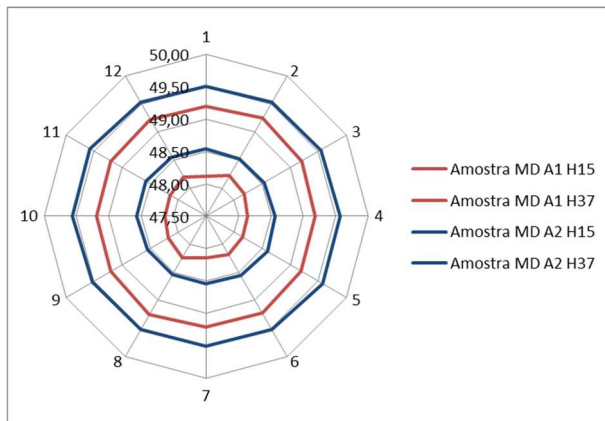
As circunferências maiores, destacadas em vermelho e azul, representam as dimensões de 15 mm, sendo que as menores, identificadas pelas mesmas cores, têm dimensionamento de 37 mm. Tal diferença se dá pelo ângulo de saída (GRÁFICOS 2, 3 e 4).

Gráfico 2 - Alumínio



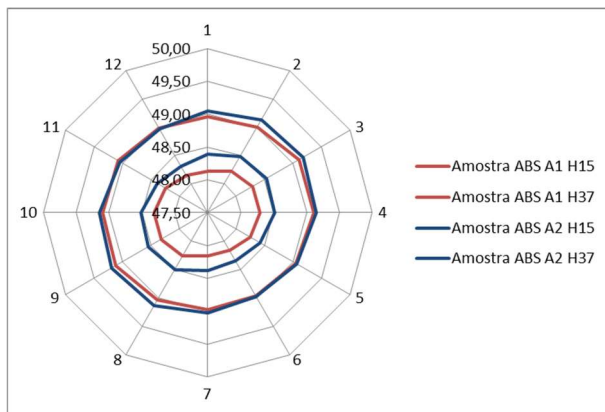
Fonte: Leandro de Bittencourt

Gráfico 3 - Madeira



Fonte: Leandro de Bittencourt

Gráfico 4 - ABS

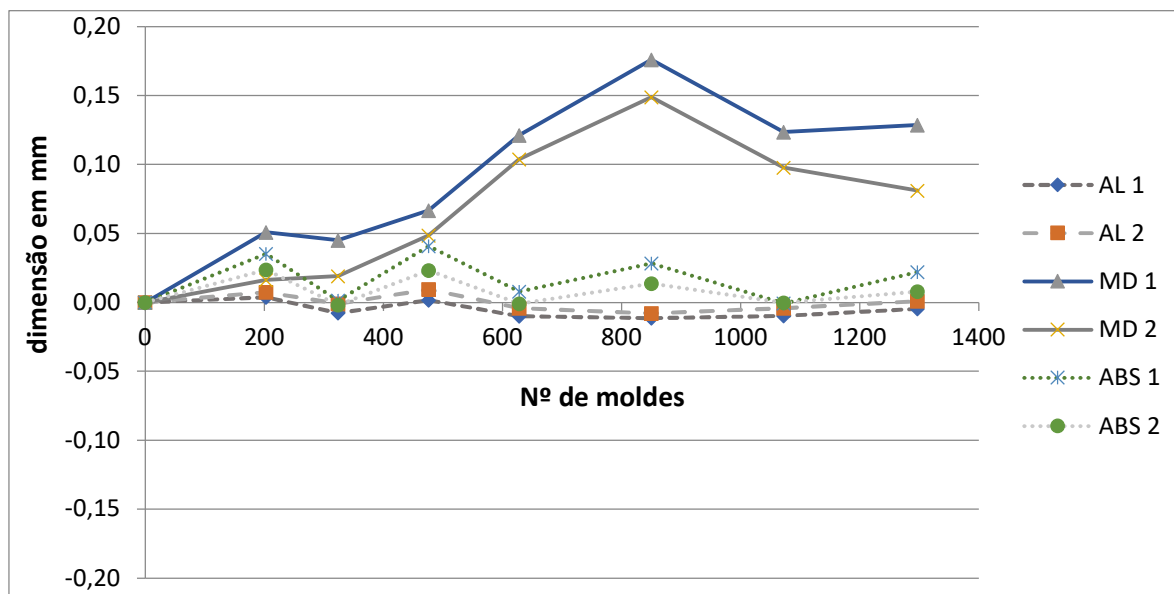


Fonte: Leandro de Bittencourt

Durante os testes, foram produzidos cerca de 1297 moldes, sendo que o procedimento para coleta dos dados realizou-se em todos com o mesmo equipamento e em iguais condições, pelo que pode observar-se que não houve desgaste significativo neles. Pode-se observar, conforme consta nos Apêndices A, B, C, D, E, F, G, H e I, as dimensões encontradas nas coletas de dados em cada intervalo de produção, destacando-se, em cor amarela, pontos de medição próximos ou que sofreram interferências de avarias.

Ao inserir a diferença das dimensões em um gráfico e, ao compará-la com a dimensão inicial, percebe-se uma pequena variação dimensional oposta à esperada, a qual é caracterizada pelo aumento na dimensão dos modelos, principalmente, no de madeira.

Gráfico 5 – Variação dimensional ao longo dos testes (número de moldes x mm)



Fonte: Leandro de Bittencourt

Apesar dos valores encontrados não apontarem para um resultado significativo, eles podem indicar o desgaste do modelo, através das dimensões, o que confirma que a utilização de alumínio ainda é superior quando comparada com outros materiais analisados. A vida útil desse modelo fica na faixa de quarenta mil a cem mil moldes, o que significa que a amostra analisada não iniciou o processo de desgaste, e a variação de medida, cerca de 0,014 mm entre a máxima e a mínima encontrada, pode ter surgido pelo erro ou desvio de medição.

As amostras em ABS apresentaram um erro de medição superior devido ao formato ovalizado, em que a diferença de posicionamento entre os pontos medidos pode interferir no resultado. Neste caso, verificou-se que a variação entre a máxima e a mínima foi de 0,032 mm.

Já a amostra em madeira apresentou uma variação de 0,126 mm entre o maior valor encontrado e o menor, representando um aumento de cerca de 0,25% na geometria. O aumento na dimensão do modelo em madeira pode ter como causa a aplicação de uma solução lubrificante, que reduz o atrito nas paredes dos moldes e auxilia na sua desmoldagem, inchando devido à permeabilidade do material e à ação do fluido.

Outra hipótese válida é diferença dimensional causada por avarias durante o manuseio do modelo, conforme a Figura 23, que indica um dano causado por outro objeto, os quais, ao tornarem-se mais frequentes e mais agressivos, atingem outros modelos.

Figura 24 - Danos identificados na moldagem 850



Fonte: Leandro de Bittencourt

Figura 25 - Danos identificados no ABS na moldagem 1297



Fonte: Leandro de Bittencourt

Figura 26 - Danos identificados na madeira na moldagem 1297



Fonte: Leandro de Bittencourt

Figura 27 - Danos identificados no alumínio na moldagem 1297



Fonte: Leandro de Bittencourt

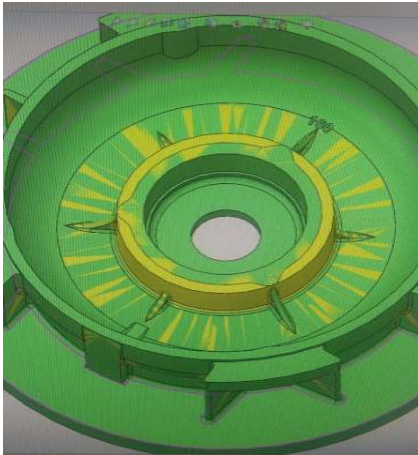
Conforme o Gráfico 1, a madeira comum tem vida útil estimada em pouco menos de mil peças, enquanto que a especial inicia seu processo de degradação a partir de mil moldes. Neste sentido, o tipo de material utilizado para as amostras de madeira é o Cedro, considerado especial por oferecer boas propriedades de acabamento ao modelo, exceto pela absorção de fluidos e o inchamento.

Pode-se observar o início da fase de desgaste no modelo em ABS pela aparência de sua superfície, visto que, inicialmente, os frisos causados pela deposição das camadas de material eram bastante aparentes e, ao decorrer das moldagens, a superfície foi ficando mais lisa, fazendo com que os frisos fossem diminuindo.

4.1 Outros trabalhos realizados

Durante o desenvolvimento deste trabalho, surgiram outras necessidades de construção de modelos impressos. O primeiro deles foi em uma alteração de engenharia, onde o cliente solicitou o aumento do anel central em um lote de peças. Pelo processo convencional, o modelo seria enviado a uma usinadora para a construção de uma cavidade e a confecção de dois insertos intercambiáveis, um para o diâmetro maior e outro para o diâmetro menor, ambos confeccionados utilizando equipamentos de usinagem CNC. Mas, com o auxílio da impressora 3D, foi feito um inserto para o aumento do diâmetro sem que houvesse a necessidade da usinagem do modelo.

Figura 28 - Alteração solicitada



Fonte: Leandro de Bittencourt

Figura 29 - Planejamento



Fonte: Leandro de Bittencourt

Figura 30 - Inserto impresso em ABS



Fonte: Leandro de Bittencourt

Figura 31 - Modelo original



Fonte: Leandro de Bittencourt

Figura 32 - Modelo alterado



Fonte: Leandro de Bittencourt

Figura 33 - Peças com acréscimo de material



Fonte: Leandro de Bittencourt

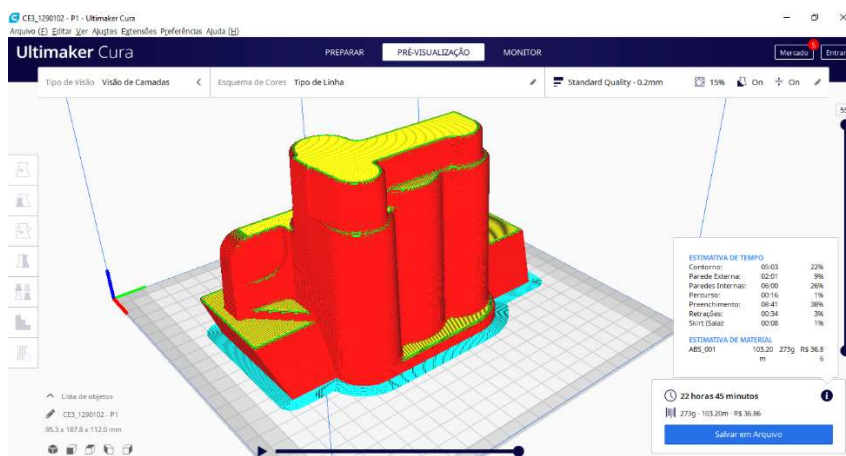
O segundo caso ocorreu pela necessidade de estudo de posicionamento de um item de produção com alto índice de refugo: Atualmente, a linha de divisão do modelo fica ao longo da peça, ou seja, horizontalmente, e o processo de impressão é construído para que haja a divisão perpendicular ao comprimento da peça, o que

altera o comportamento da solidificação e o destino dos gases oriundos do processo, gerando tal problema.

Neste projeto, o modelo todo foi fabricado em, aproximadamente, 40h30min, utilizando cerca de 460g de filamento a um custo total estimado em R\$90,00 (noventa reais), considerando o material utilizado e a energia elétrica necessária. Estima-se que, através de processos convencionais, o custo gerado foi de R\$900,00 (novecentos reais) para um modelo em madeira, construído manualmente por meio de processos de colagem e usinagem. Para o alumínio, através de usinadora CNC, a estimativa de valor oscila entre R\$2.000,00 (dois mil reais) e R\$3.000,00 (três mil reais).⁵

Os passos para desenvolvimento do protótipo foram os mesmos utilizados para a confecção das amostras avaliadas neste trabalho. Primeiramente, o desenho foi formulado utilizando o programa *SolidWorks*; posteriormente, o software *Ultimaker Cura* foi usado para fazer a programação da impressora com os parâmetros requeridos, como espessura de parede e preenchimento. O modelo impresso foi fixado em uma placa de madeira para ser colocado na máquina de moldar, obtendo-se, por fim, a peça fundida necessária às análises de falhas.

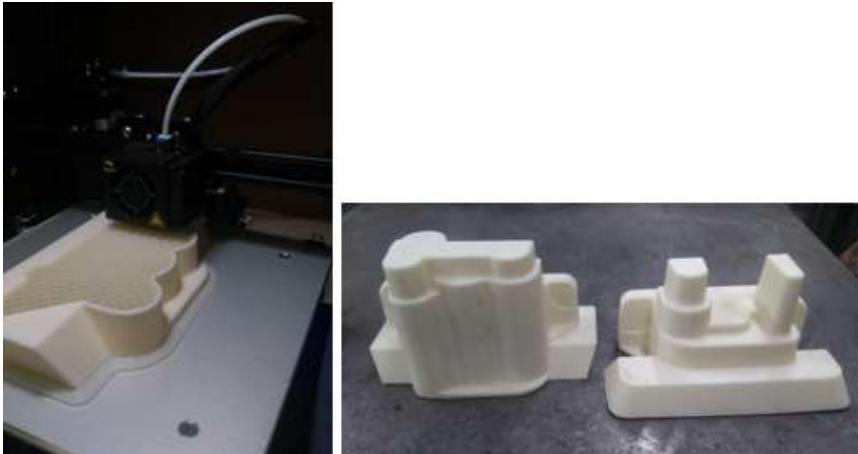
Figura 34 – Planejamento de impressão



Fonte: Print Screen do software *Ultimate Cura*

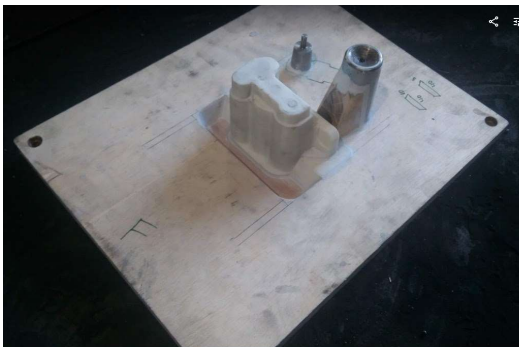
⁵Os valores são estimados pela vivência no setor de Engenharia do Produto.

Figura 35 - Construção dos modelos



Fonte: Leandro de Bittencourt

Figura 36 - Placa de moldagem



Fonte: Leandro de Bittencourt

Figura 37 - Peça fundida para análise



Fonte: Leandro de Bittencourt

5 CONCLUSÃO

Os testes realizados se demonstraram satisfatórios quanto à busca da quantificação do número de moldes fabricados em impressoras 3D convencionais no processo de moldagem mecanizada.

Atingiu-se o número de 1297 moldes produzidos, sem alteração significativa no dimensional das amostras impressas em ABS. Isto significa que, modelos impressos em ABS possuem uma vida útil acima de mil peças produzidas, sendo possível a utilização para protótipos, para lotes iniciais de amostragem de peças fundidas ou para itens de baixa produção.

Apesar de a fabricação de modelos impressos pelo processo de FFF não ser popular na indústria de fundição, o baixo custo de equipamentos em relação a outros processos, somada às vantagens quanto ao desprendimento dos processos manuais, oferecem, à indústria, uma alternativa viável entre modelos de fabricação artesanal e com materiais nobres de alta durabilidade com custo superior.

Através do comparativo das amostras submetidas ao teste, a impressão em ABS pode ser um bom substituto à madeira, pois a variação dimensional apresentada torna questionável a garantia dimensional dos modelos neste último material.

Posteriormente, este trabalho poderá ter continuidade a partir da análise mais ampla do desgaste e do comportamento deste em outras geometrias.

REFERÊNCIAS

ALBUQUERQUE, Bruno S. **Estudo da Fabricação de Ferramental de Fundição por Manufatura Aditiva**. 2017. Monografia (Graduação) – Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Paraná, Pato Branco, 2017. Disponível em: <http://repositorio.roca.utfpr.edu.br/jspui/bitstream/1/9214/1/PB_DAMEC_2017_2_02.pdf>. Acesso em: 2 jun. 2020.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR ISO/ASTM 52900: Manufatura Aditiva – Princípios Gerais - Terminologia**. Rio de Janeiro: ABNT, 2018.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12798: Ferramental de fundição**. Rio de Janeiro: ABNT, 1993.

BALDAM, Roquemar de Lima. **Fundição: processos e tecnologias correlatadas** – 2. ed. rev. São Paulo: Érica, 2014.

BENEDETTO, Ricardo M. **Relatório de Estágio Curricular III** – Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2009. Disponível em: <<http://aneste.org/relatrio-de-estgio-curricular-iii.html>>. Acesso em: 6 out. 2019.

BESKO, Marcos et al. Gest. **Aspectos técnicos e nocivos dos principais filamentos usados em impressão 3D**. Technol. Innov. Vol.01 n.3, 2017.

FELISBINO, Sílvio Luiz. **Desenho de Fundição**. Sociedade Educacional de Santa Catarina: Joinville, 2005.

LINO, F. Jorge; NETO, Rui J. - **A prototipagem rápida na indústria nacional**. In. ENCONTRO NACIONAL DO COLÉGIO DE ENGENHARIA MECÂNICA DA ORDEM DOS ENGENHEIROS, 2., 2000, Coimbra. **Anais...** Coimbra: 2000, p. 415-422.

OLIVEIRA, Flávio Z.; RUBIO, Juan C.C. **Cenário de Manufatura integrada para produção de moldes e matrizes**. 2004. Dissertação (Pós-graduação) – Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2011. Disponível em: < https://repositorio.ufmg.br/bitstream/1843/BUOS-8S8LZQ/1/disserta__o_wadersonoliveiraleite_engprodu__o.pdf>. Acesso em: 6 out. 2019.

SENAI-RS. **Informações Técnicas-Mecânica**. 10. ed. ver e ampl. Porto Alegre: CFP SENAI de Artes Graficas “Henrique d’Avila Bertaso”, 1996. 260p. il

SINGEL, M. **Fundição**. 15. Ed. São Paulo: ABM, 1985.

TORRE, Jorge. **Manual Prático de Fundição e elementos de prevenção da corrosão**. São Paulo: Editora Hemus, 2004.

VOLPATO, Neri et al. **Prototipagem rápida: tecnologias e aplicações**. 1ª ed. São Paulo: Edgard Blücher, 2007.

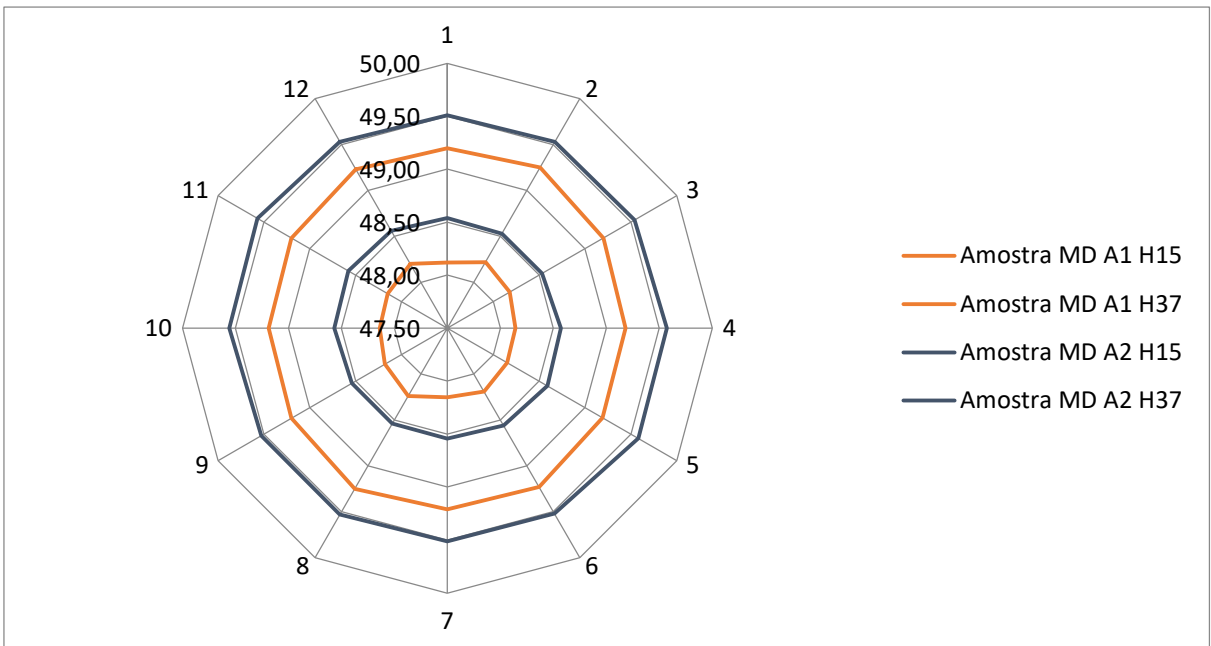
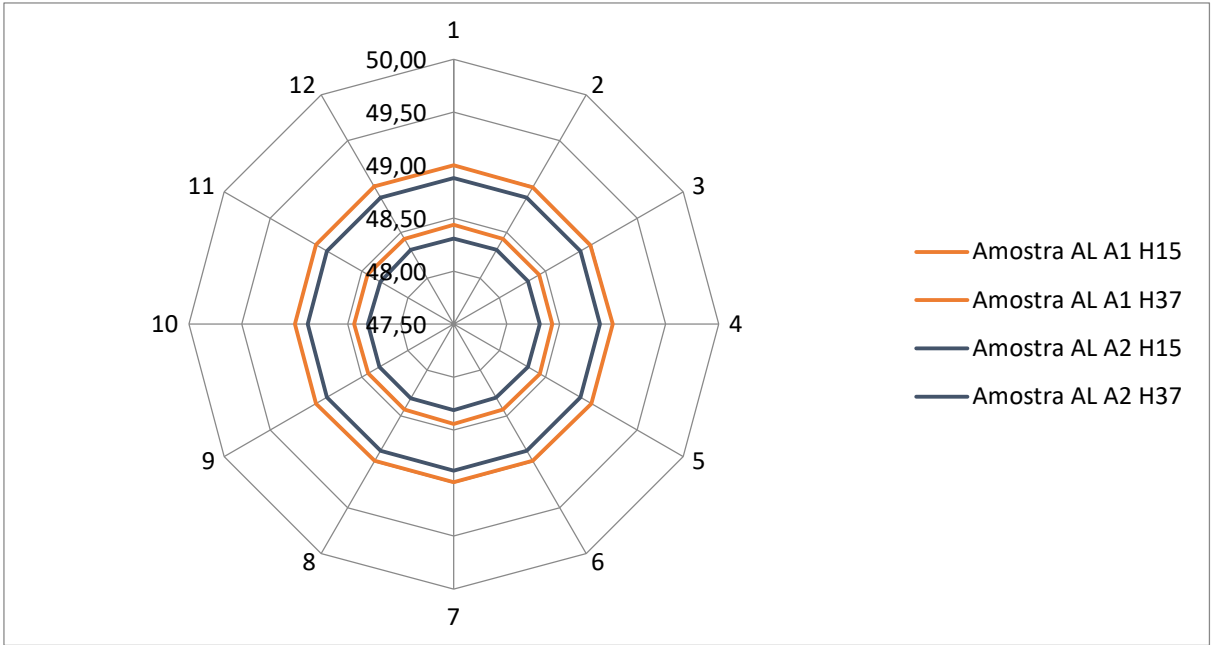
VOLPATO, Neri. **Manufatura aditiva: tecnologias e aplicações da impressão 3D**. São Paulo: Blucher, 2017.

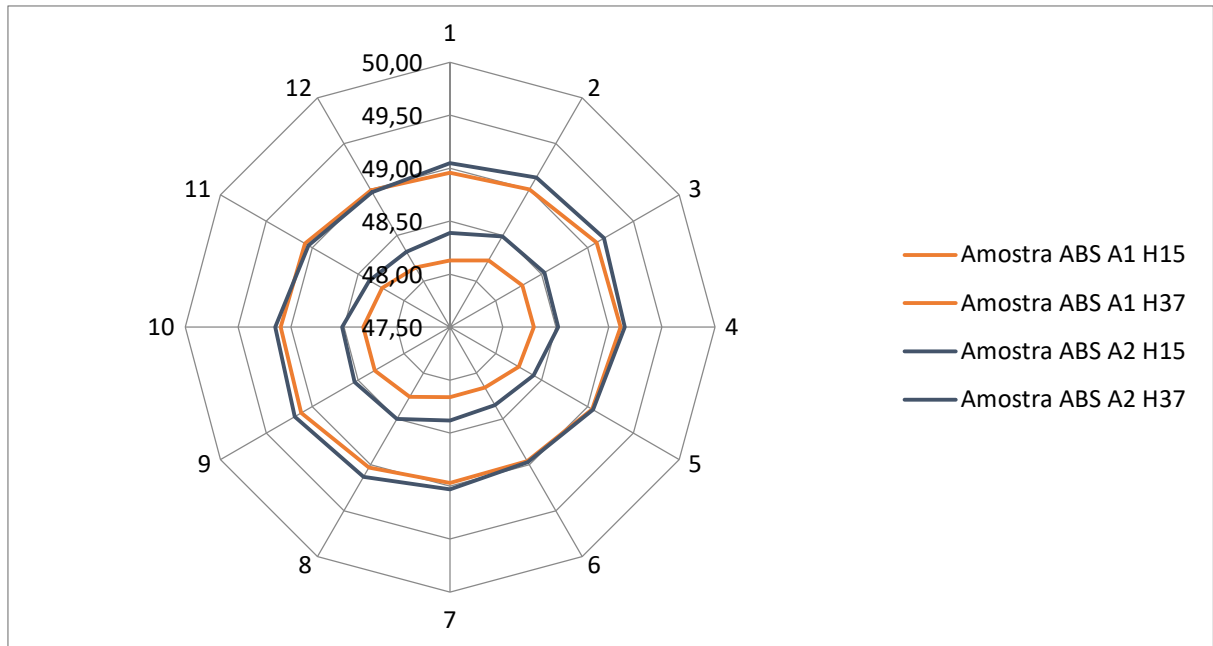
APÊNDICE

APÊNDICE A – Molde inicial

CONDIÇÃO INICIAL	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	Média
Amostra AL A1 H15	49,00	48,99	48,99	49,00	49,00	48,99	48,99	48,99	49,00	49,00	49,00	49,00	48,996
Amostra AL A1 H37	48,44	48,43	48,43	48,43	48,44	48,43	48,44	48,43	48,43	48,44	48,44	48,43	48,434
Amostra AL A2 H15	48,88	48,88	48,88	48,88	48,88	48,88	48,88	48,88	48,88	48,88	48,88	48,88	48,88
Amostra AL A2 H37	48,31	48,31	48,31	48,31	48,31	48,30	48,31	48,31	48,31	48,31	48,30	48,31	48,308
Amostra MD A1 H15	49,20	49,25	49,20	49,18	49,19	49,23	49,21	49,25	49,20	49,19	49,20	49,23	49,211
Amostra MD A1 H37	48,12	48,22	48,18	48,14	48,15	48,19	48,15	48,24	48,18	48,14	48,15	48,20	48,172
Amostra MD A2 H15	49,51	49,53	49,54	49,57	49,58	49,52	49,51	49,53	49,53	49,56	49,57	49,53	49,54
Amostra MD A2 H37	48,54	48,53	48,53	48,57	48,59	48,56	48,54	48,54	48,54	48,57	48,58	48,56	48,554
Amostra ABS A1 H15	48,96	49,00	49,10	49,11	49,05	48,96	48,97	49,03	49,12	49,10	49,08	48,99	49,039
Amostra ABS A1 H37	48,13	48,23	48,29	48,29	48,25	48,16	48,16	48,26	48,32	48,32	48,24	48,15	48,233
Amostra ABS A2 H15	49,05	49,13	49,18	49,15	49,06	48,97	49,03	49,13	49,19	49,15	49,04	48,97	49,088
Amostra ABS A2 H37	48,39	48,49	48,53	48,52	48,41	48,35	48,38	48,50	48,54	48,52	48,38	48,32	48,444

CONDIÇÃO INICIAL	Valor máximo	Valor mínimo	Diferença	Variação 180° 1	Variação 180° 2	Variação 180° 3	Variação 180° 4	Variação 180° 5	Variação 180° 6
Amostra AL A1 H15	49,00	48,99	0,01	-0,01	0,00	0,01	0,00	0,00	0,01
Amostra AL A1 H37	48,44	48,43	0,01	0,00	0,00	0,00	0,01	0,00	0,00
Amostra AL A2 H15	48,88	48,88	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Amostra AL A2 H37	48,31	48,30	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	-0,01	0,01
Amostra MD A1 H15	49,25	49,18	0,07	0,01	0,00	0,00	0,01	0,01	0,00
Amostra MD A1 H37	48,24	48,12	0,12	0,03	0,02	0,00	0,00	0,00	0,01
Amostra MD A2 H15	49,58	49,51	0,07	0,00	0,00	-0,01	-0,01	-0,01	0,01
Amostra MD A2 H37	48,59	48,53	0,06	0,00	0,01	0,01	0,00	-0,01	0,00
Amostra ABS A1 H15	49,12	48,96	0,16	0,01	0,03	0,02	-0,01	0,03	0,03
Amostra ABS A1 H37	48,32	48,13	0,19	0,03	0,03	0,03	0,03	-0,01	-0,01
Amostra ABS A2 H15	49,19	48,97	0,22	-0,02	0,00	0,01	0,00	-0,02	0,00
Amostra ABS A2 H37	48,54	48,32	0,22	-0,01	0,01	0,01	0,00	-0,03	-0,03

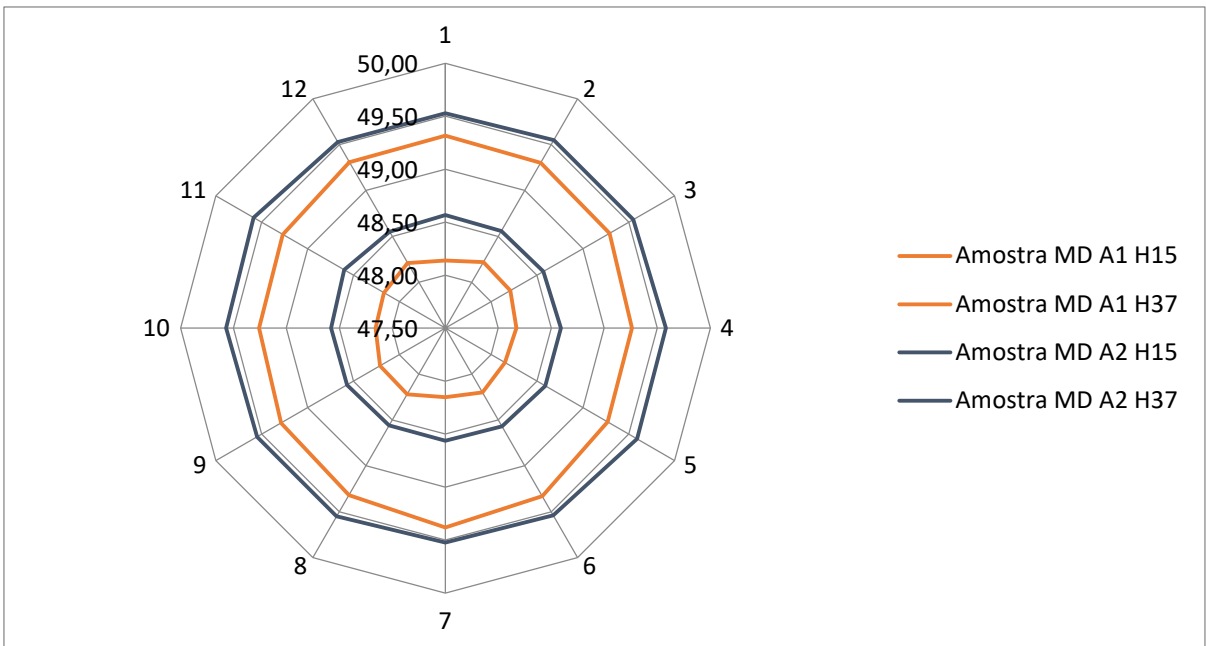
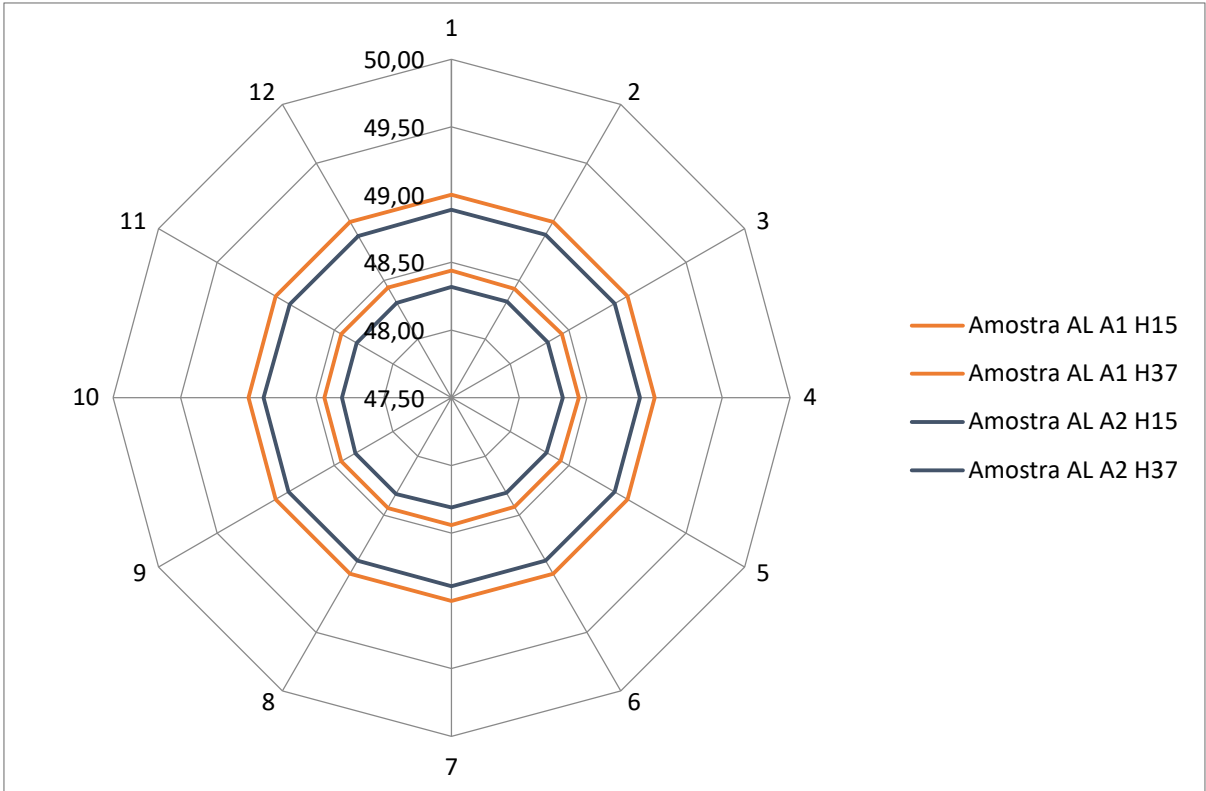


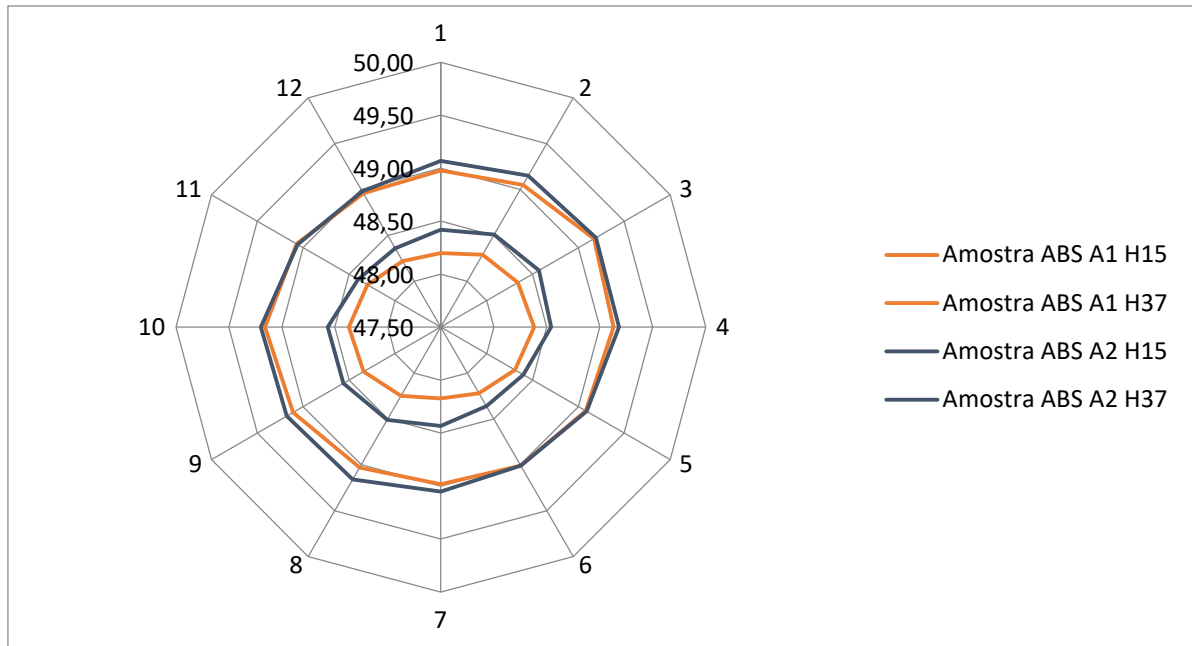


APÊNDICE B – Molde 203

CONDIÇÃO INICIAL	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	Média
Amostra AL A1 H15	49,00	49,00	49,00	49,00	49,00	49,00	49,00	49,00	49,00	49,00	49,00	49,00	49
Amostra AL A1 H37	48,44	48,43	48,44	48,44	48,43	48,43	48,44	48,44	48,44	48,44	48,44	48,44	48,4375
Amostra AL A2 H15	48,89	48,89	48,89	48,89	48,89	48,89	48,89	48,89	48,89	48,89	48,88	48,88	48,88833333
Amostra AL A2 H37	48,32	48,32	48,32	48,32	48,31	48,31	48,31	48,32	48,32	48,31	48,31	48,31	48,315
Amostra MD A1 H15	49,32	49,30	49,29	49,26	49,27	49,33	49,38	49,32	49,29	49,26	49,27	49,31	49,3
Amostra MD A1 H37	48,14	48,22	48,21	48,17	48,15	48,20	48,15	48,22	48,21	48,16	48,17	48,21	48,18416667
Amostra MD A2 H15	49,53	49,55	49,55	49,58	49,59	49,54	49,52	49,55	49,55	49,57	49,59	49,53	49,55416667
Amostra MD A2 H37	48,57	48,56	48,57	48,59	48,59	48,57	48,56	48,56	48,57	48,58	48,60	48,55	48,55416667
Amostra ABS A1 H15	48,98	49,05	49,17	49,13	49,08	49,01	48,98	49,03	49,11	49,16	49,07	48,96	49,06083333
Amostra ABS A1 H37	48,20	48,29	48,34	48,38	48,31	48,22	48,17	48,25	48,34	48,37	48,30	48,22	48,2825
Amostra ABS A2 H15	49,07	49,15	49,19	49,18	49,09	49,01	49,05	49,16	49,18	49,20	49,06	48,98	49,11
Amostra ABS A2 H37	48,42	48,51	48,57	48,54	48,40	48,36	48,43	48,51	48,56	48,57	48,40	48,36	48,46916667

CONDIÇÃO INICIAL	Valor máximo	Valor mínimo	Diferença	Varição 180° 1	Varição 180° 2	Varição 180° 3	Varição 180° 4	Varição 180° 5	Varição 180° 6
Amostra AL A1 H15	49,00	49,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Amostra AL A1 H37	48,44	48,43	0,01	0,00	0,01	0,00	0,00	0,01	0,01
Amostra AL A2 H15	48,89	48,88	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	-0,01	-0,01
Amostra AL A2 H37	48,32	48,31	0,01	-0,01	0,00	0,00	-0,01	0,00	0,00
Amostra MD A1 H15	49,38	49,26	0,12	0,06	0,02	0,00	0,00	0,00	-0,02
Amostra MD A1 H37	48,22	48,14	0,08	0,01	0,00	0,00	-0,01	0,02	0,01
Amostra MD A2 H15	49,59	49,52	0,07	-0,01	0,00	0,00	-0,01	0,00	-0,01
Amostra MD A2 H37	48,60	48,55	0,05	-0,01	0,00	0,00	-0,01	0,01	-0,02
Amostra ABS A1 H15	49,17	48,96	0,21	0,00	-0,02	-0,06	0,03	-0,01	-0,05
Amostra ABS A1 H37	48,38	48,17	0,21	-0,03	-0,04	0,00	-0,01	-0,01	0,00
Amostra ABS A2 H15	49,20	48,98	0,22	-0,02	0,01	-0,01	0,02	-0,03	-0,03
Amostra ABS A2 H37	48,57	48,36	0,21	0,01	0,00	-0,01	0,03	0,00	0,00

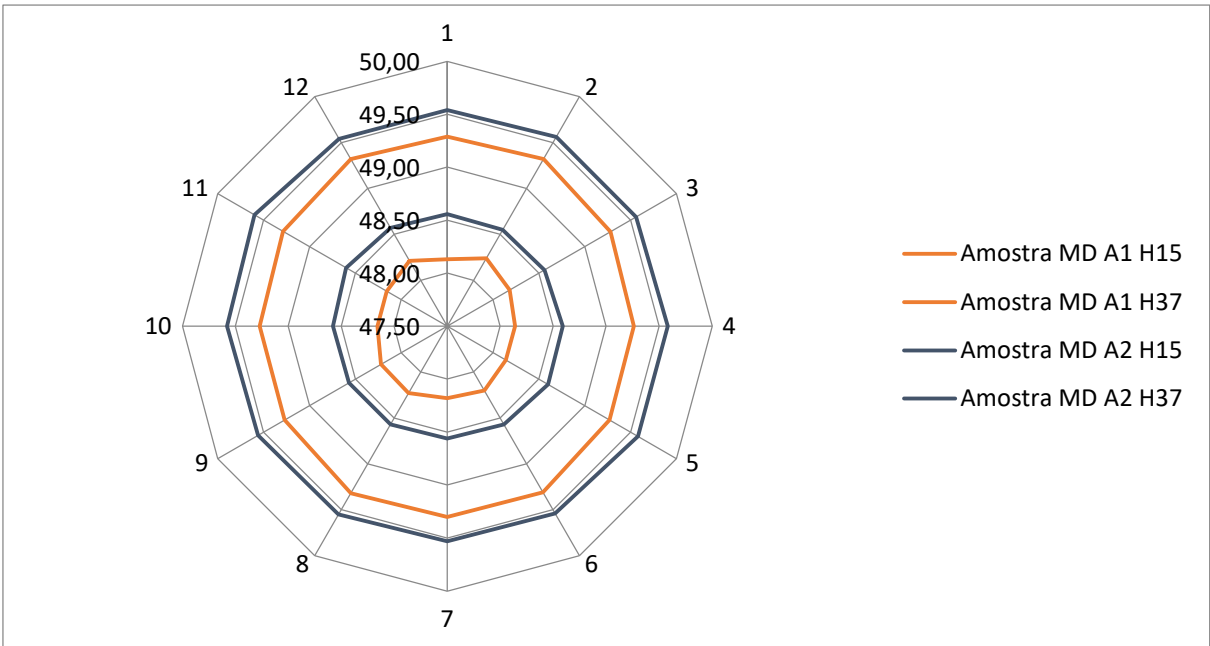
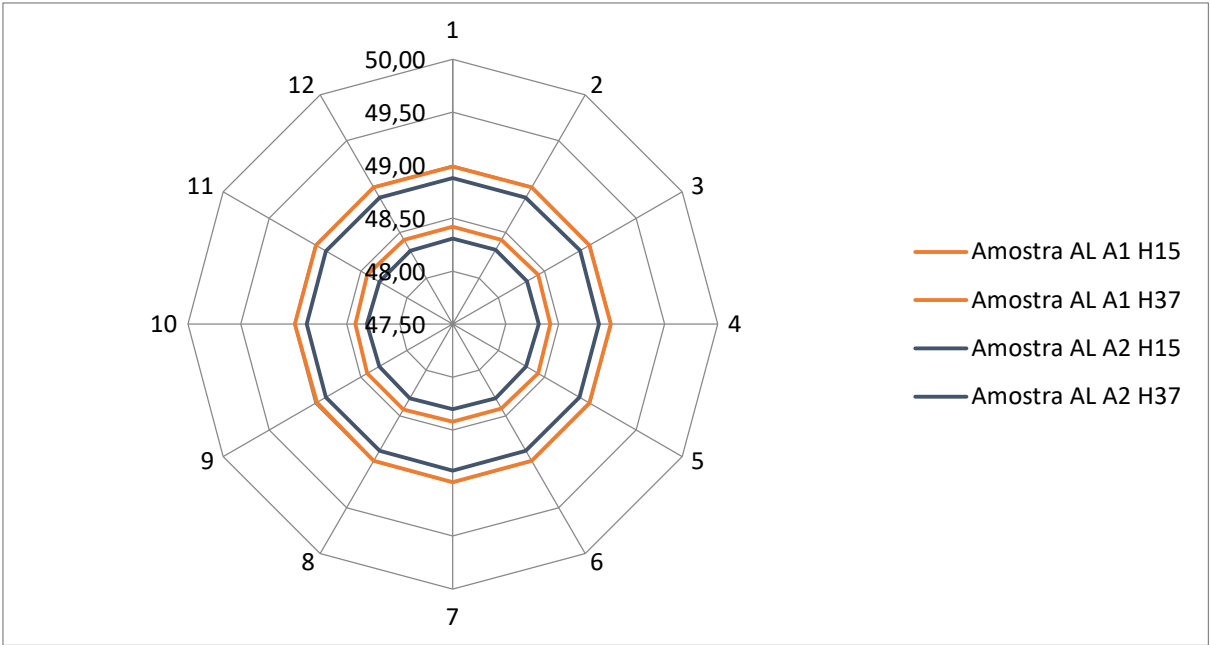


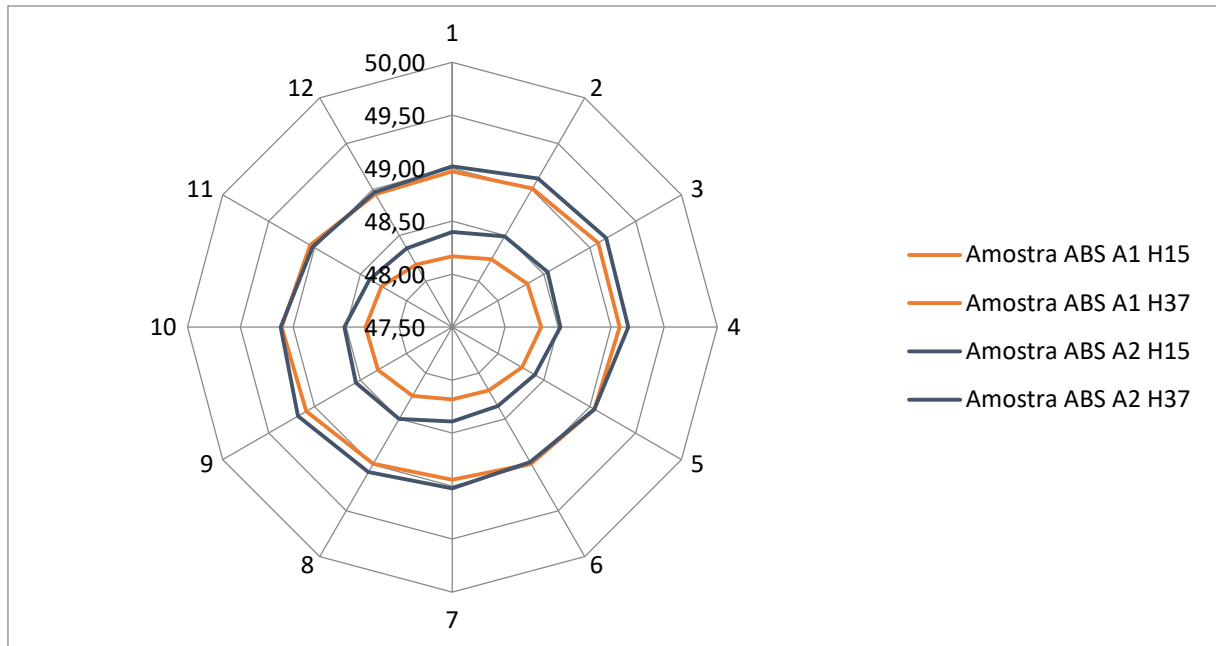


APÊNDICE C – Molde 324

CONDIÇÃO INICIAL	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	Média
Amostra AL A1 H15	48,99	48,99	48,99	48,99	48,99	48,99	48,99	48,99	48,98	48,99	48,99	48,99	48,989
Amostra AL A1 H37	48,42	48,42	48,43	48,42	48,43	48,42	48,42	48,43	48,43	48,42	48,43	48,42	48,424
Amostra AL A2 H15	48,88	48,88	48,89	48,88	48,88	48,88	48,88	48,88	48,88	48,88	48,88	48,88	48,881
Amostra AL A2 H37	48,31	48,31	48,31	48,31	48,30	48,31	48,30	48,31	48,30	48,31	48,30	48,30	48,306
Amostra MD A1 H15	49,29	49,32	49,28	49,26	49,27	49,31	49,30	49,32	49,27	49,27	49,29	49,32	49,292
Amostra MD A1 H37	48,13	48,24	48,18	48,14	48,14	48,20	48,18	48,23	48,22	48,16	48,16	48,21	48,183
Amostra MD A2 H15	49,54	49,56	49,56	49,58	49,58	49,54	49,53	49,55	49,56	49,58	49,60	49,54	49,56
Amostra MD A2 H37	48,56	48,55	48,56	48,59	48,60	48,57	48,56	48,57	48,57	48,58	48,60	48,57	48,554
Amostra ABS A1 H15	48,97	49,01	49,09	49,08	49,05	48,99	48,94	48,99	49,09	49,11	49,05	48,95	49,027
Amostra ABS A1 H37	48,17	48,24	48,32	48,34	48,26	48,19	48,18	48,25	48,31	48,32	48,27	48,18	48,253
Amostra ABS A2 H15	49,02	49,12	49,18	49,16	49,05	48,97	49,02	49,08	49,18	49,12	49,02	48,97	49,074
Amostra ABS A2 H37	48,40	48,49	48,54	48,52	48,40	48,36	48,39	48,50	48,55	48,52	48,40	48,36	48,453

CONDIÇÃO INICIAL	Valor máximo	Valor mínimo	Diferença	Varição 180° 1	Varição 180° 2	Varição 180° 3	Varição 180° 4	Varição 180° 5	Varição 180° 6
Amostra AL A1 H15	48,99	48,98	0,01	0,00	0,00	-0,01	0,00	0,00	0,00
Amostra AL A1 H37	48,43	48,42	0,01	0,00	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00
Amostra AL A2 H15	48,89	48,88	0,01	0,00	0,00	-0,01	0,00	0,00	0,00
Amostra AL A2 H37	48,31	48,30	0,01	-0,01	0,00	-0,01	0,00	0,00	-0,01
Amostra MD A1 H15	49,32	49,26	0,06	0,01	0,00	-0,01	0,01	0,02	0,01
Amostra MD A1 H37	48,24	48,13	0,11	0,05	-0,01	0,04	0,02	0,02	0,01
Amostra MD A2 H15	49,60	49,53	0,07	-0,01	-0,01	0,00	0,00	0,02	0,00
Amostra MD A2 H37	48,60	48,55	0,05	0,00	0,02	0,01	-0,01	0,00	0,00
Amostra ABS A1 H15	49,11	48,94	0,17	-0,03	-0,02	0,00	0,03	0,00	-0,04
Amostra ABS A1 H37	48,34	48,17	0,17	0,01	0,01	-0,01	-0,02	0,01	-0,01
Amostra ABS A2 H15	49,18	48,97	0,21	0,00	-0,04	0,00	-0,04	-0,03	0,00
Amostra ABS A2 H37	48,55	48,36	0,19	-0,01	0,01	0,01	0,00	0,00	0,00

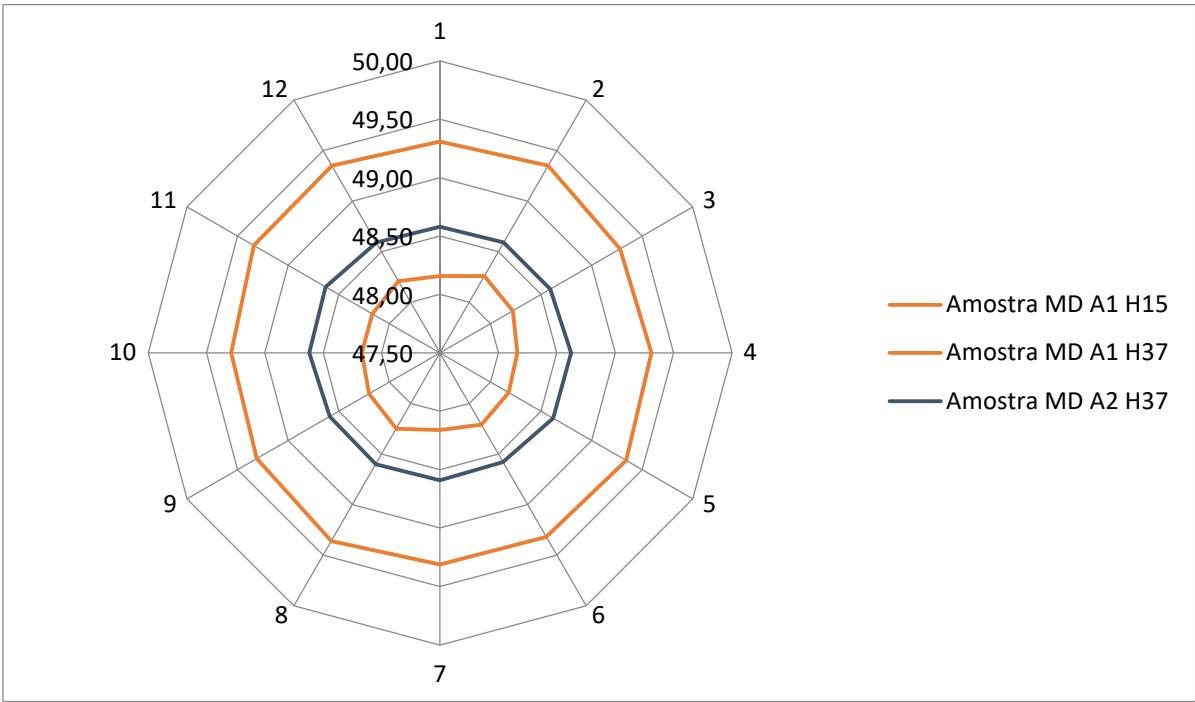
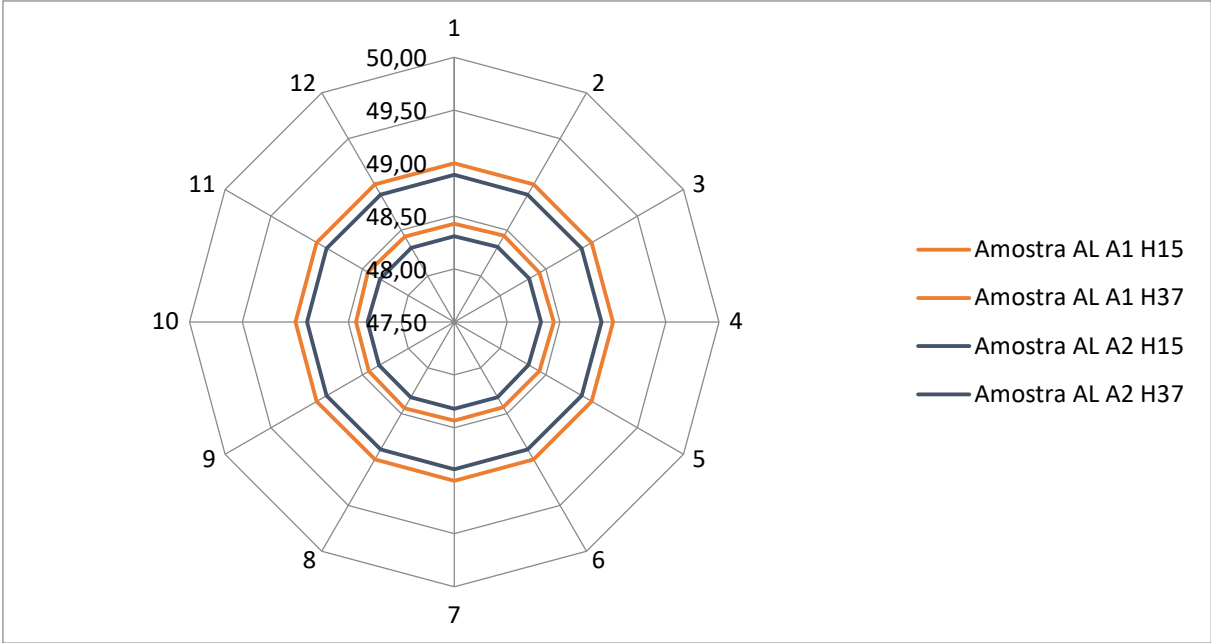


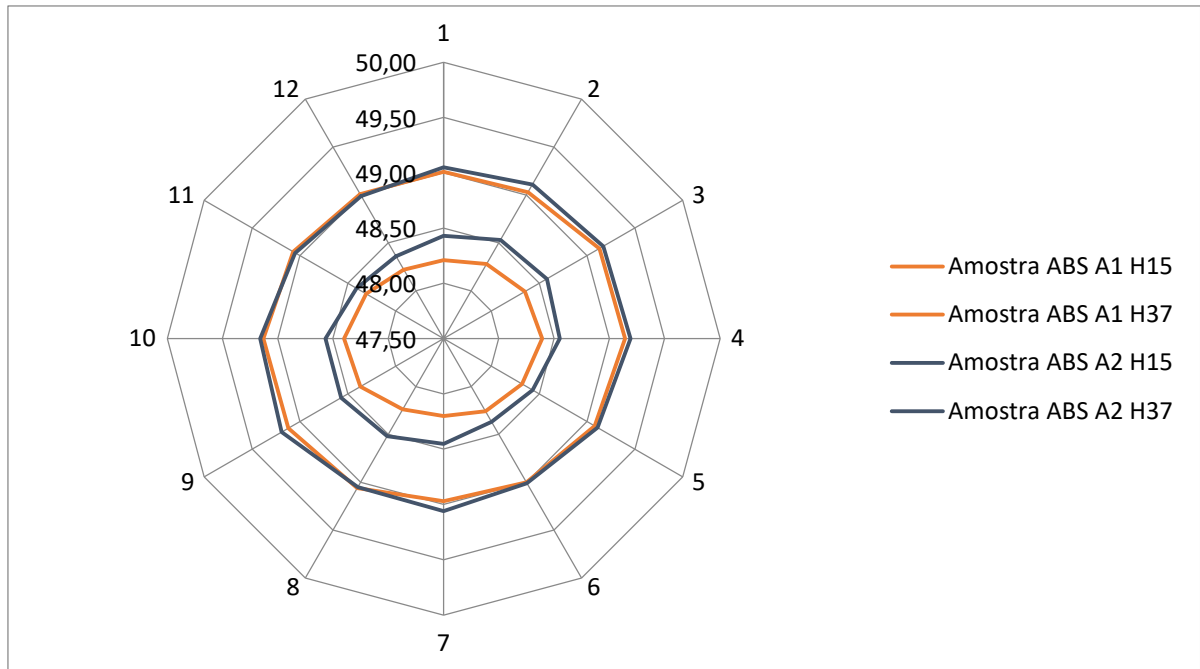


APÊNDICE D – Molde 476

CONDIÇÃO INICIAL	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	Média
Amostra AL A1 H15	49,00	49,00	49,00	49,00	49,00	49,00	49,00	49,00	49,00	49,00	49,00	49,00	49
Amostra AL A1 H37	48,43	48,44	48,43	48,44	48,43	48,43	48,43	48,44	48,43	48,43	48,44	48,43	48,433
Amostra AL A2 H15	48,89	48,89	48,89	48,89	48,89	48,89	48,89	48,89	48,89	48,89	48,89	48,89	48,89
Amostra AL A2 H37	48,31	48,32	48,32	48,32	48,31	48,32	48,32	48,32	48,32	48,32	48,31	48,31	48,317
Amostra MD A1 H15	49,31	49,35	49,28	49,31	49,34	49,32	49,31	49,36	49,31	49,29	49,34	49,35	49,323
Amostra MD A1 H37	48,16	48,26	48,22	48,16	48,18	48,21	48,16	48,25	48,20	48,17	48,17	48,21	48,196
Amostra MD A2 H15	49,56	49,60	49,62	49,60	49,62	49,56	49,55	49,60	49,61	49,62	49,61	49,57	49,593
Amostra MD A2 H37	48,58	48,59	48,59	48,62	48,62	48,58	48,59	48,60	48,59	48,62	48,63	48,59	48,554
Amostra ABS A1 H15	49,01	49,03	49,13	49,14	49,08	49,00	48,97	49,06	49,12	49,13	49,07	49,01	49,063
Amostra ABS A1 H37	48,21	48,28	48,35	48,39	48,32	48,26	48,20	48,24	48,37	48,40	48,31	48,22	48,296
Amostra ABS A2 H15	49,05	49,11	49,17	49,19	49,11	49,01	49,06	49,05	49,19	49,16	49,05	48,99	49,095
Amostra ABS A2 H37	48,43	48,53	48,58	48,55	48,43	48,37	48,45	48,52	48,57	48,57	48,41	48,36	48,481

CONDIÇÃO INICIAL	Valor máximo	Valor mínimo	Diferença	Variação 180° 1	Variação 180° 2	Variação 180° 3	Variação 180° 4	Variação 180° 5	Variação 180° 6
Amostra AL A1 H15	49,00	49,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Amostra AL A1 H37	48,44	48,43	0,01	0,00	0,00	0,00	-0,01	0,01	0,00
Amostra AL A2 H15	48,89	48,89	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Amostra AL A2 H37	48,32	48,31	0,01	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	-0,01
Amostra MD A1 H15	49,36	49,28	0,08	0,00	0,01	0,03	-0,02	0,00	0,03
Amostra MD A1 H37	48,26	48,16	0,10	0,00	-0,01	-0,02	0,01	-0,01	0,00
Amostra MD A2 H15	49,62	49,55	0,07	-0,01	0,00	-0,01	0,02	-0,01	0,01
Amostra MD A2 H37	48,63	48,58	0,05	0,01	0,01	0,00	0,00	0,01	0,01
Amostra ABS A1 H15	49,14	48,97	0,17	-0,04	0,03	-0,01	-0,01	-0,01	0,01
Amostra ABS A1 H37	48,40	48,20	0,20	-0,01	-0,04	0,02	0,01	-0,01	-0,04
Amostra ABS A2 H15	49,19	48,99	0,20	0,01	-0,06	0,02	-0,03	-0,06	-0,02
Amostra ABS A2 H37	48,58	48,36	0,22	0,02	-0,01	-0,01	0,02	-0,02	-0,01

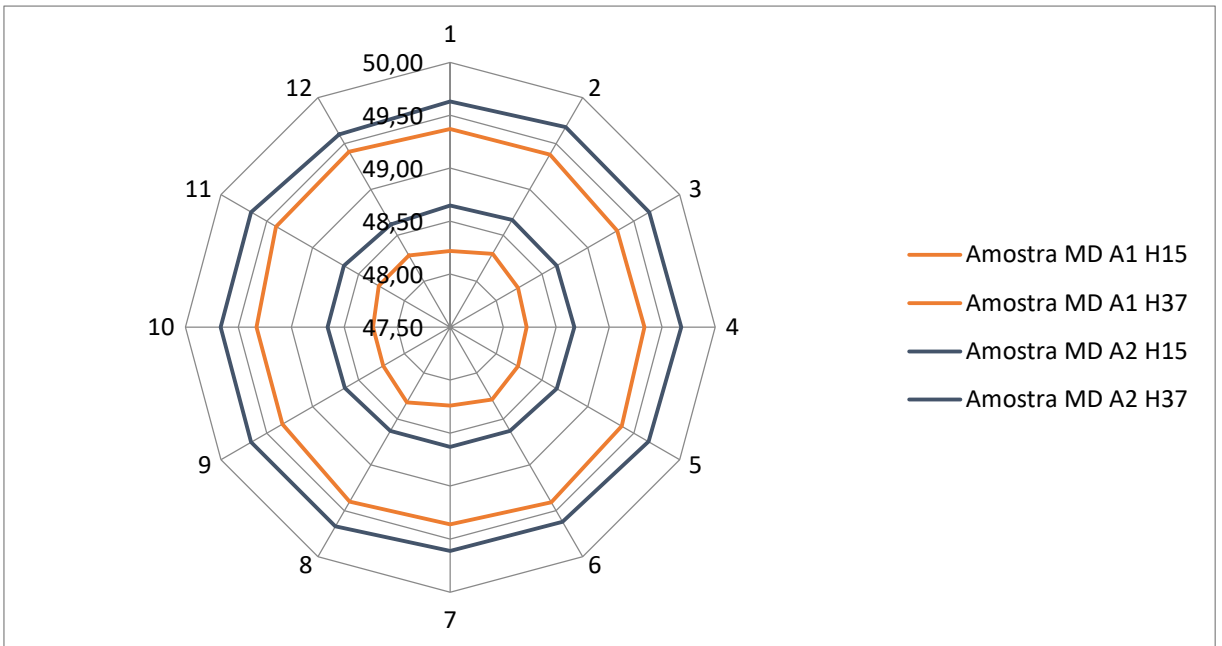
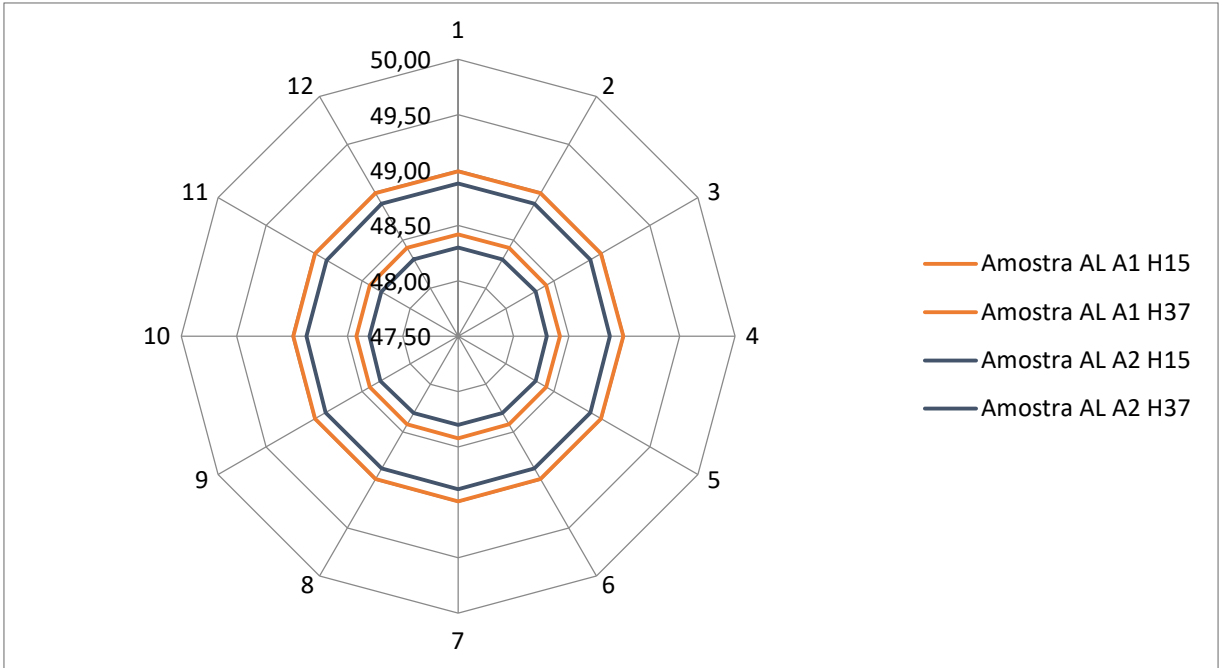


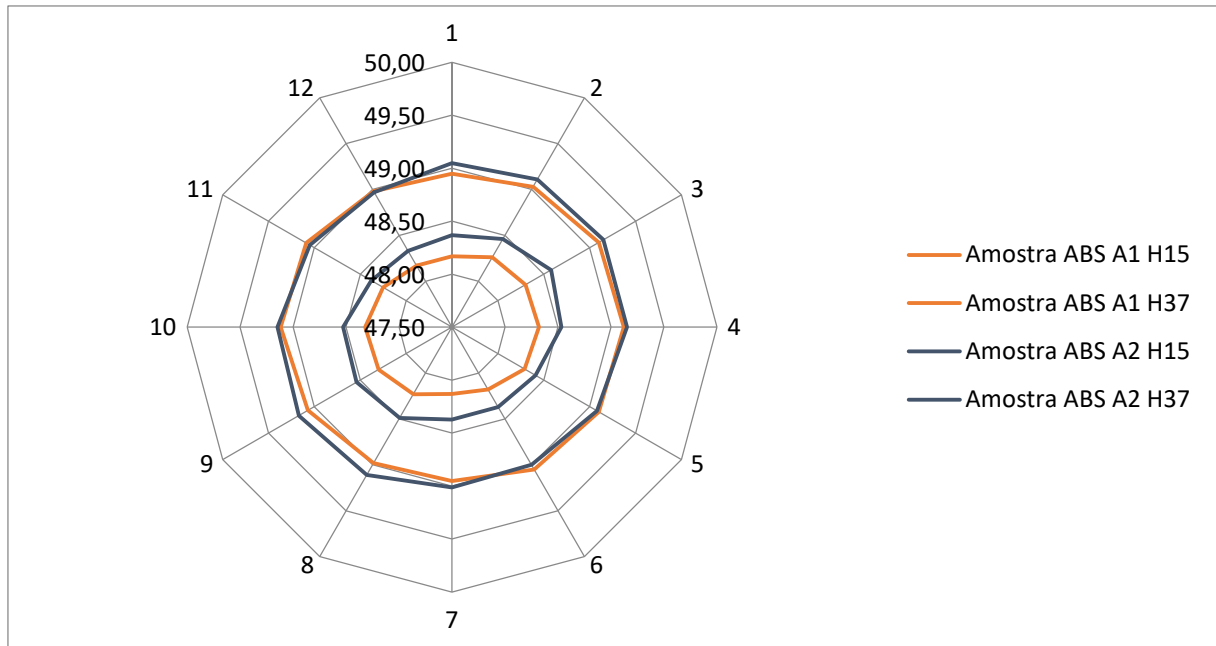


APÊNDICE E – Molde 628

CONDIÇÃO INICIAL	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	Média
Amostra AL A1 H15	48,99	48,99	48,99	48,99	48,99	48,99	48,99	48,99	48,99	48,99	48,99	48,99	48,99
Amostra AL A1 H37	48,42	48,42	48,42	48,42	48,42	48,42	48,42	48,42	48,42	48,42	48,42	48,42	48,42
Amostra AL A2 H15	48,88	48,88	48,88	48,87	48,88	48,88	48,88	48,88	48,88	48,87	48,87	48,88	48,878
Amostra AL A2 H37	48,30	48,30	48,31	48,30	48,31	48,30	48,30	48,30	48,31	48,30	48,30	48,30	48,303
Amostra MD A1 H15	49,37	49,38	49,32	49,33	49,37	49,41	49,36	49,40	49,33	49,33	49,40	49,41	49,368
Amostra MD A1 H37	48,22	48,30	48,24	48,22	48,24	48,29	48,24	48,32	48,23	48,23	48,28	48,28	48,258
Amostra MD A2 H15	49,63	49,68	49,67	49,68	49,66	49,62	49,61	49,67	49,67	49,67	49,67	49,60	49,653
Amostra MD A2 H37	48,65	48,67	48,66	48,67	48,66	48,63	48,63	48,63	48,65	48,66	48,66	48,62	48,554
Amostra ABS A1 H15	48,95	49,03	49,10	49,12	49,10	49,05	48,95	48,98	49,07	49,12	49,09	48,98	49,045
Amostra ABS A1 H37	48,17	48,26	48,30	48,32	48,29	48,18	48,13	48,23	48,30	48,32	48,25	48,17	48,243
Amostra ABS A2 H15	49,05	49,11	49,15	49,15	49,08	49,00	49,01	49,11	49,17	49,15	49,05	48,97	49,083
Amostra ABS A2 H37	48,37	48,46	48,58	48,53	48,41	48,37	48,37	48,49	48,54	48,53	48,38	48,33	48,447

CONDIÇÃO INICIAL	Valor máximo	Valor mínimo	Diferença	Variação 180° 1	Variação 180° 2	Variação 180° 3	Variação 180° 4	Variação 180° 5	Variação 180° 6
Amostra AL A1 H15	48,99	48,99	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Amostra AL A1 H37	48,42	48,42	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Amostra AL A2 H15	48,88	48,87	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	-0,01	0,00
Amostra AL A2 H37	48,31	48,30	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	-0,01	0,00
Amostra MD A1 H15	49,41	49,32	0,09	-0,01	0,02	0,01	0,00	0,03	0,00
Amostra MD A1 H37	48,32	48,22	0,10	0,02	0,02	-0,01	0,01	0,04	-0,01
Amostra MD A2 H15	49,68	49,60	0,08	-0,02	-0,01	0,00	-0,01	0,01	-0,02
Amostra MD A2 H37	48,67	48,62	0,05	-0,02	-0,04	-0,01	-0,01	0,00	-0,01
Amostra ABS A1 H15	49,12	48,95	0,17	0,00	-0,05	-0,03	0,00	-0,01	-0,07
Amostra ABS A1 H37	48,32	48,13	0,19	-0,04	-0,03	0,00	0,00	-0,04	-0,01
Amostra ABS A2 H15	49,17	48,97	0,20	-0,04	0,00	0,02	0,00	-0,03	-0,03
Amostra ABS A2 H37	48,58	48,33	0,25	0,00	0,03	-0,04	0,00	-0,03	-0,04

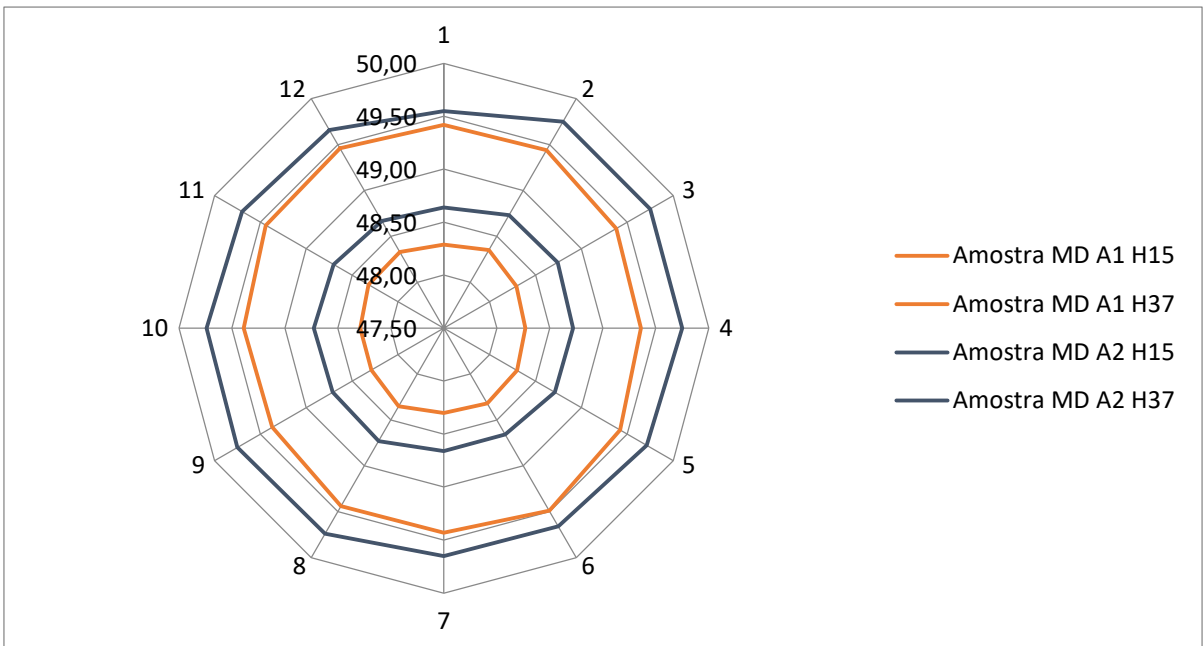
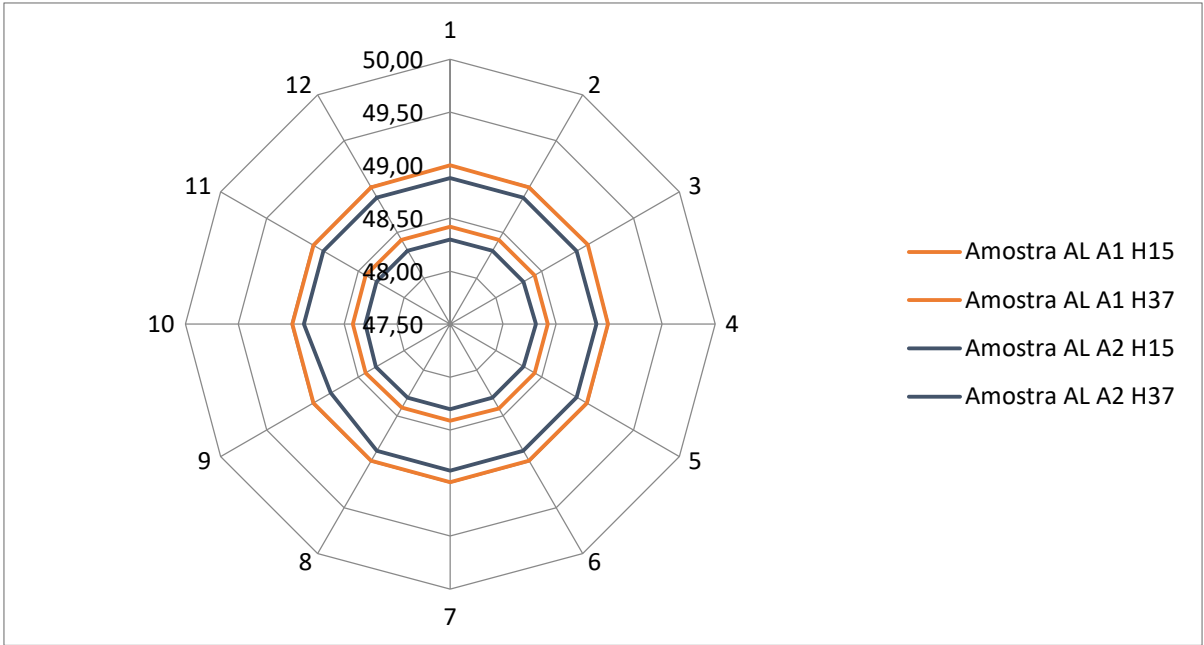


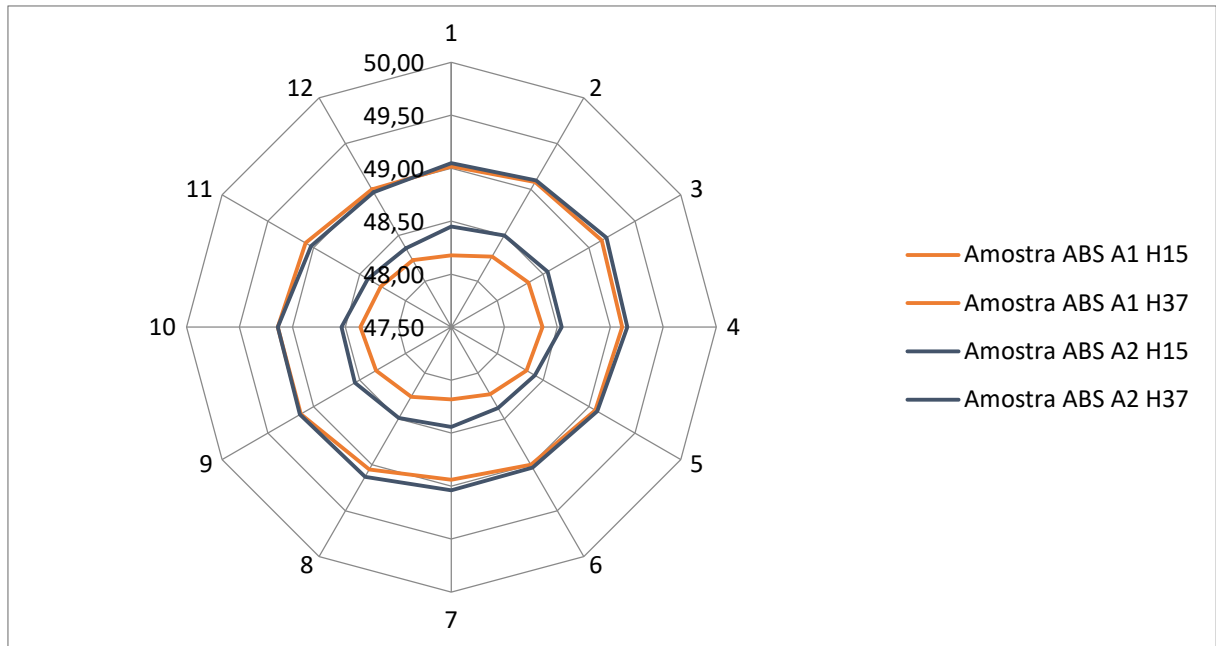


APÊNDICE F – Molde 850

CONDIÇÃO INICIAL	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	Média
Amostra AL A1 H15	49,00	48,99	49,00	48,99	48,99	48,99	48,99	48,99	48,99	48,99	48,99	48,99	48,992
Amostra AL A1 H37	48,42	48,42	48,42	48,42	48,42	48,42	48,41	48,41	48,42	48,42	48,42	48,42	48,418
Amostra AL A2 H15	48,88	48,88	48,88	48,88	48,88	48,88	48,88	48,88	48,88	48,88	48,88	48,88	48,873
Amostra AL A2 H37	48,30	48,30	48,30	48,31	48,30	48,30	48,30	48,30	48,31	48,30	48,30	48,30	48,302
Amostra MD A1 H15	49,42	49,44	49,38	49,36	49,42	49,49	49,43	49,44	49,37	49,39	49,44	49,46	49,42
Amostra MD A1 H37	48,29	48,35	48,29	48,27	48,30	48,32	48,30	48,35	48,29	48,29	48,32	48,33	48,308
Amostra MD A2 H15	49,55	49,75	49,75	49,75	49,71	49,66	49,65	49,74	49,75	49,74	49,70	49,66	49,701
Amostra MD A2 H37	48,64	48,73	48,74	48,72	48,71	48,66	48,66	48,73	48,71	48,73	48,70	48,67	48,554
Amostra ABS A1 H15	49,02	49,08	49,14	49,11	49,07	49,00	48,94	49,05	49,14	49,14	49,09	49,00	49,065
Amostra ABS A1 H37	48,18	48,27	48,34	48,36	48,32	48,23	48,18	48,26	48,32	48,36	48,27	48,23	48,277
Amostra ABS A2 H15	49,05	49,10	49,19	49,16	49,09	49,03	49,04	49,13	49,15	49,14	49,03	48,97	49,09
Amostra ABS A2 H37	48,45	48,50	48,55	48,54	48,41	48,38	48,44	48,49	48,55	48,54	48,41	48,36	48,468

CONDIÇÃO INICIAL	Valor máximo	Valor mínimo	Diferença	Varição 180° 1	Varição 180° 2	Varição 180° 3	Varição 180° 4	Varição 180° 5	Varição 180° 6
Amostra AL A1 H15	49,00	48,99	0,01	-0,01	0,00	-0,01	0,00	0,00	0,00
Amostra AL A1 H37	48,42	48,41	0,01	-0,01	-0,01	0,00	0,00	0,00	0,00
Amostra AL A2 H15	48,88	48,80	0,08	0,00	0,00	-0,08	0,00	0,00	0,00
Amostra AL A2 H37	48,31	48,30	0,01	0,00	0,00	0,01	-0,01	0,00	0,00
Amostra MD A1 H15	49,49	49,36	0,13	0,01	0,00	-0,01	0,03	0,02	-0,03
Amostra MD A1 H37	48,35	48,27	0,08	0,01	0,00	0,00	0,02	0,02	0,01
Amostra MD A2 H15	49,75	49,55	0,20	0,10	-0,01	0,00	-0,01	-0,01	0,00
Amostra MD A2 H37	48,74	48,64	0,10	0,02	0,00	-0,03	0,01	-0,01	0,01
Amostra ABS A1 H15	49,14	48,94	0,20	-0,08	-0,03	0,00	0,03	0,02	0,00
Amostra ABS A1 H37	48,36	48,18	0,18	0,00	-0,01	-0,02	0,00	-0,05	0,00
Amostra ABS A2 H15	49,19	48,97	0,22	-0,01	0,03	-0,04	-0,02	-0,06	-0,06
Amostra ABS A2 H37	48,55	48,36	0,19	-0,01	-0,01	0,00	0,00	0,00	-0,02

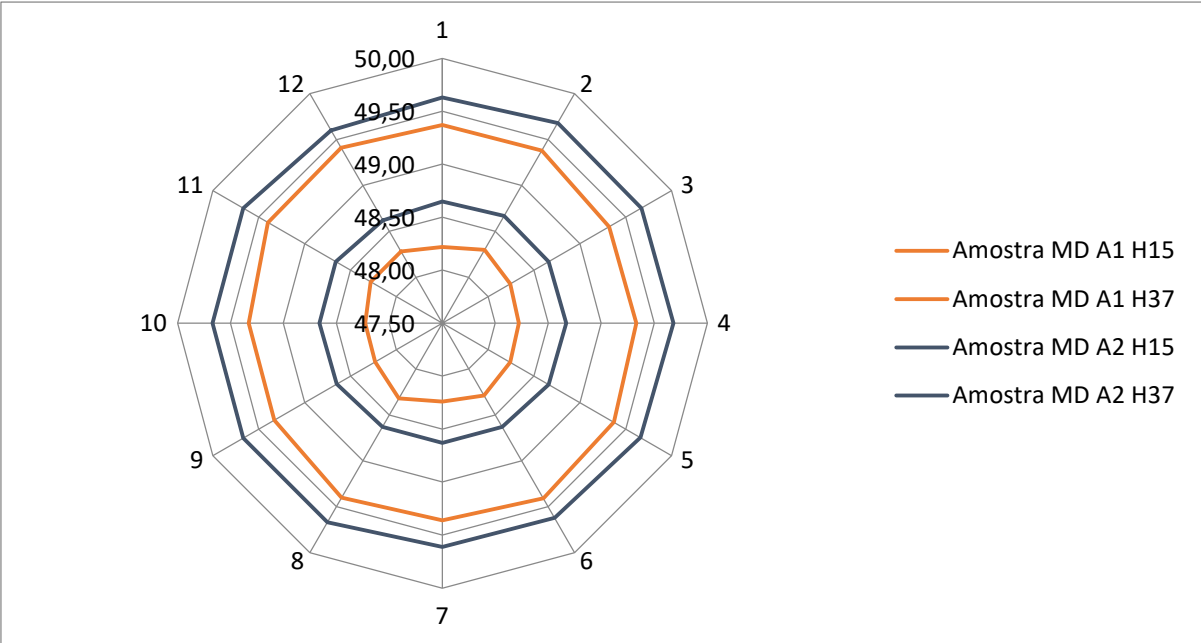
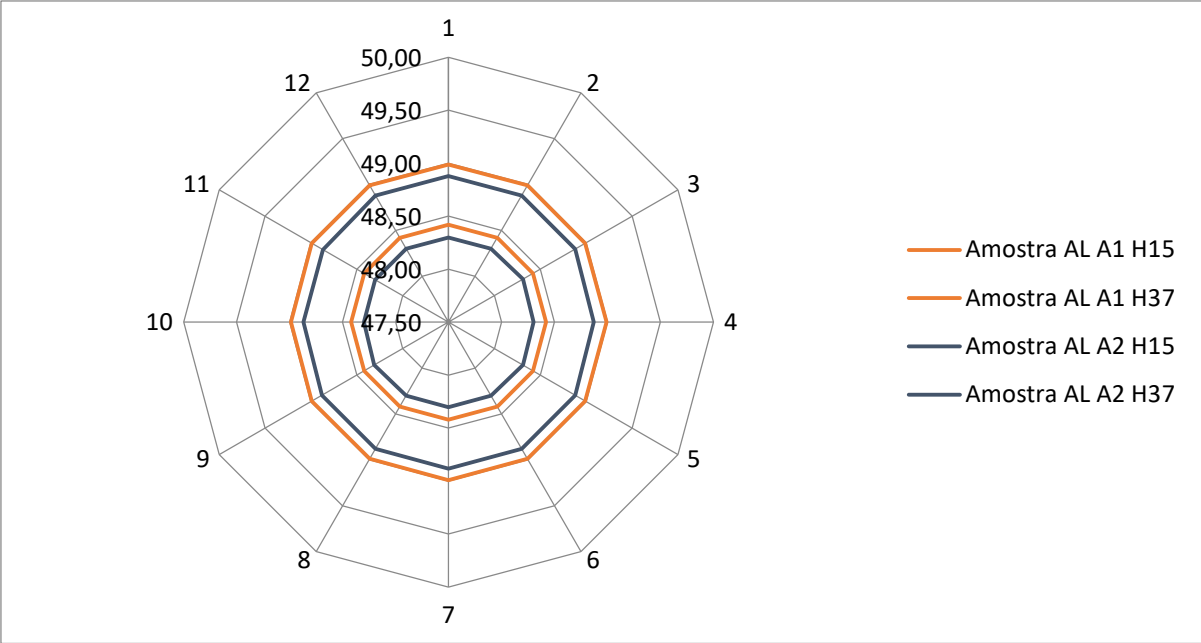


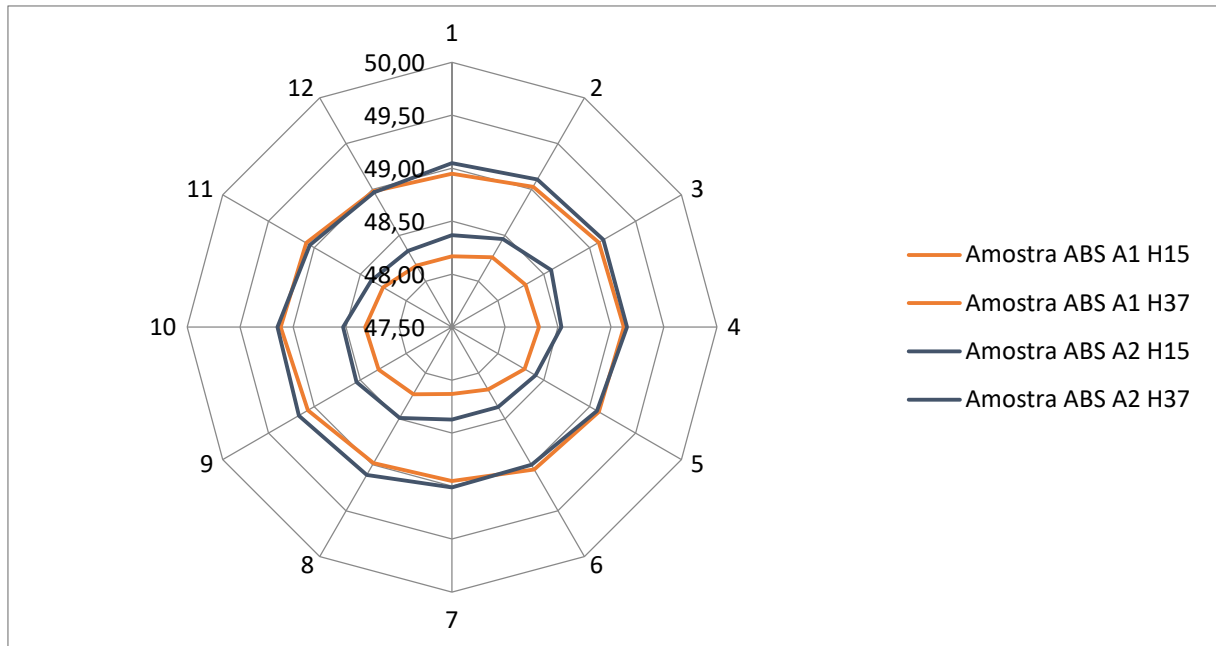


APÊNDICE G – Molde 1072

CONDIÇÃO INICIAL	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	Média
Amostra AL A1 H15	48,99	48,99	48,99	48,99	48,99	48,99	48,99	48,99	48,99	48,99	48,99	48,99	48,99
Amostra AL A1 H37	48,42	48,42	48,42	48,42	48,42	48,42	48,42	48,42	48,42	48,42	48,42	48,42	48,42
Amostra AL A2 H15	48,88	48,88	48,88	48,87	48,88	48,88	48,88	48,88	48,88	48,87	48,87	48,88	48,878
Amostra AL A2 H37	48,30	48,30	48,31	48,30	48,31	48,30	48,30	48,30	48,31	48,30	48,30	48,30	48,303
Amostra MD A1 H15	49,37	49,38	49,32	49,33	49,37	49,41	49,36	49,40	49,33	49,33	49,40	49,41	49,368
Amostra MD A1 H37	48,22	48,30	48,24	48,22	48,24	48,29	48,24	48,32	48,23	48,23	48,28	48,28	48,258
Amostra MD A2 H15	49,63	49,68	49,67	49,68	49,66	49,62	49,61	49,67	49,67	49,67	49,67	49,60	49,653
Amostra MD A2 H37	48,65	48,67	48,66	48,67	48,66	48,63	48,63	48,63	48,65	48,66	48,66	48,62	48,649
Amostra ABS A1 H15	48,95	49,03	49,10	49,12	49,10	49,05	48,95	48,98	49,07	49,12	49,09	48,98	49,045
Amostra ABS A1 H37	48,17	48,26	48,30	48,32	48,29	48,18	48,13	48,23	48,30	48,32	48,25	48,17	48,243
Amostra ABS A2 H15	49,05	49,11	49,15	49,15	49,08	49,00	49,01	49,11	49,17	49,15	49,05	48,97	49,083
Amostra ABS A2 H37	48,37	48,46	48,58	48,53	48,41	48,37	48,37	48,49	48,54	48,53	48,38	48,33	48,447

CONDIÇÃO INICIAL	Valor máximo	Valor mínimo	Diferença	Variação 180° 1	Variação 180° 2	Variação 180° 3	Variação 180° 4	Variação 180° 5	Variação 180° 6
Amostra AL A1 H15	48,99	48,99	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Amostra AL A1 H37	48,42	48,42	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Amostra AL A2 H15	48,88	48,87	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	-0,01	0,00
Amostra AL A2 H37	48,31	48,30	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	-0,01	0,00
Amostra MD A1 H15	49,41	49,32	0,09	-0,01	0,02	0,01	0,00	0,03	0,00
Amostra MD A1 H37	48,32	48,22	0,10	0,02	0,02	-0,01	0,01	0,04	-0,01
Amostra MD A2 H15	49,68	49,60	0,08	-0,02	-0,01	0,00	-0,01	0,01	-0,02
Amostra MD A2 H37	48,67	48,62	0,05	-0,02	-0,04	-0,01	-0,01	0,00	-0,01
Amostra ABS A1 H15	49,12	48,95	0,17	0,00	-0,05	-0,03	0,00	-0,01	-0,07
Amostra ABS A1 H37	48,32	48,13	0,19	-0,04	-0,03	0,00	0,00	-0,04	-0,01
Amostra ABS A2 H15	49,17	48,97	0,20	-0,04	0,00	0,02	0,00	-0,03	-0,03
Amostra ABS A2 H37	48,58	48,33	0,25	0,00	0,03	-0,04	0,00	-0,03	-0,04

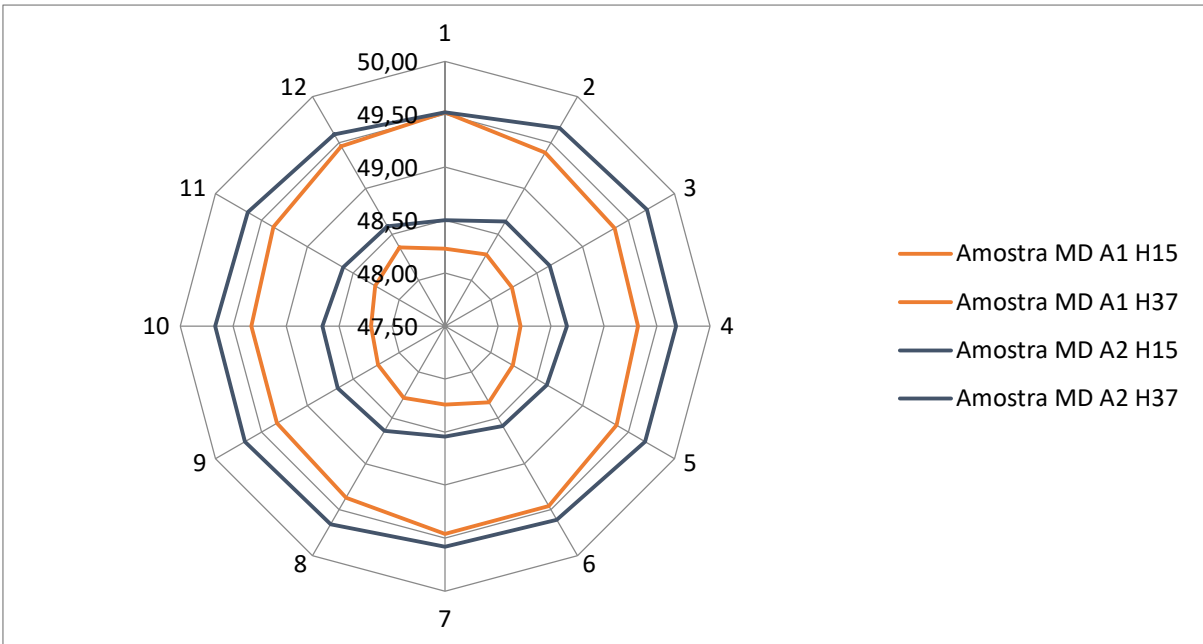
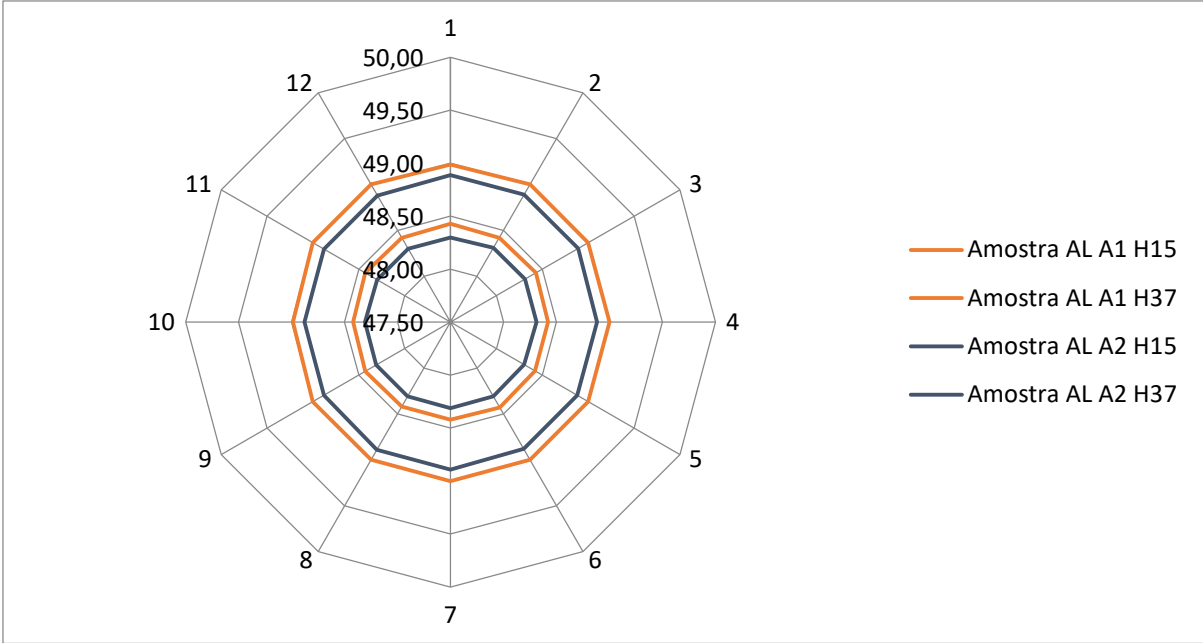


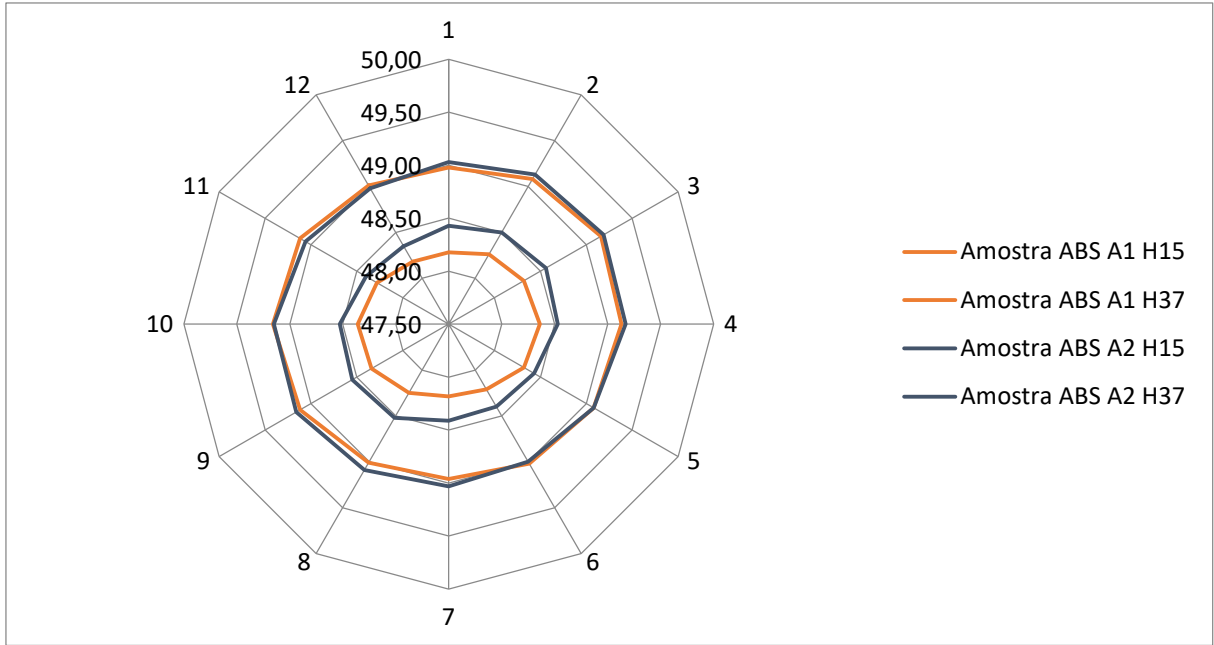


APÊNDICE H – Molde 1297

CONDIÇÃO INICIAL	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	Média
Amostra AL A1 H15	48,99	49,00	49,00	49,00	49,00	49,00	49,00	49,00	49,00	48,99	49,00	49,00	48,998
Amostra AL A1 H37	48,43	48,42	48,43	48,42	48,42	48,43	48,42	48,42	48,43	48,42	48,43	48,42	48,424
Amostra AL A2 H15	48,89	48,89	48,89	48,88	48,88	48,88	48,89	48,89	48,88	48,88	48,88	48,88	48,884
Amostra AL A2 H37	48,30	48,31	48,31	48,31	48,30	48,31	48,31	48,31	48,31	48,31	48,30	48,30	48,307
Amostra MD A1 H15	49,52	49,39	49,35	49,32	49,37	49,46	49,46	49,37	49,33	49,33	49,37	49,46	49,394
Amostra MD A1 H37	48,23	48,28	48,23	48,21	48,24	48,33	48,24	48,28	48,23	48,20	48,26	48,36	48,258
Amostra MD A2 H15	49,52	49,66	49,70	49,68	49,68	49,61	49,58	49,66	49,68	49,67	49,65	49,59	49,64
Amostra MD A2 H37	48,50	48,64	48,64	48,65	48,61	48,59	48,54	48,64	48,67	48,66	48,61	48,59	48,554
Amostra ABS A1 H15	48,98	49,08	49,16	49,13	49,08	49,02	48,96	49,01	49,12	49,16	49,12	49,01	49,069
Amostra ABS A1 H37	48,18	48,26	48,32	48,36	48,32	48,21	48,18	48,25	48,34	48,36	48,28	48,18	48,27
Amostra ABS A2 H15	49,03	49,13	49,19	49,17	49,08	49,00	49,03	49,09	49,16	49,15	49,06	48,98	49,089
Amostra ABS A2 H37	48,43	48,50	48,56	48,53	48,43	48,40	48,41	48,52	48,55	48,53	48,40	48,35	48,468

CONDIÇÃO INICIAL	Valor máximo	Valor mínimo	Diferença	Varição 180° 1	Varição 180° 2	Varição 180° 3	Varição 180° 4	Varição 180° 5	Varição 180° 6
Amostra AL A1 H15	49,00	48,99	0,01	0,01	0,00	0,00	-0,01	0,00	0,00
Amostra AL A1 H37	48,43	48,42	0,01	-0,01	0,00	0,00	0,00	0,01	-0,01
Amostra AL A2 H15	48,89	48,88	0,01	0,00	0,00	-0,01	0,00	0,00	0,00
Amostra AL A2 H37	48,31	48,30	0,01	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	-0,01
Amostra MD A1 H15	49,52	49,32	0,20	-0,06	-0,02	-0,02	0,01	0,00	0,00
Amostra MD A1 H37	48,36	48,20	0,16	0,01	0,00	0,00	-0,01	0,02	0,03
Amostra MD A2 H15	49,70	49,52	0,18	0,06	0,00	-0,02	-0,01	-0,03	-0,02
Amostra MD A2 H37	48,67	48,50	0,17	0,04	0,00	0,03	0,01	0,00	0,00
Amostra ABS A1 H15	49,16	48,96	0,20	-0,02	-0,07	-0,04	0,03	0,04	-0,01
Amostra ABS A1 H37	48,36	48,18	0,18	0,00	-0,01	0,02	0,00	-0,04	-0,03
Amostra ABS A2 H15	49,19	48,98	0,21	0,00	-0,04	-0,03	-0,02	-0,02	-0,02
Amostra ABS A2 H37	48,56	48,35	0,21	-0,02	0,02	-0,01	0,00	-0,03	-0,05





APÊNDICE I – Gráfico

